



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - TE 141599

**ANALISIS KESTABILAN TRANSIEN DAN PELEPASAN BEBAN
PADA SISTEM INTEGRASI 33 KV PT. PERTAMINA RU IV
CILACAP AKIBAT PENAMBAHAN BEBAN RFCC DAN PLBC**

Firdaus Ariansyah
NRP 2213106062

Dosen Pembimbing
Dr. Eng. Ardyono Priyadi, ST., M.Eng.
Dr. Ir. Margo Pujiantara, MT.

JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2015



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

FINAL PROJECT - TE 141599

**TRANSIENT STABILITY ANALYSIS AND LOAD SHEDDING AT 33
KV INTEGRATED SYSTEM OF PT. PERTAMINA RU IV CILACAP
DUE TO THE ADDITION OF RFCC AND PLBC LOAD**

Firdaus Ariansyah
NRP 2213106062

Advisor
Dr. Eng. Ardyono Priyadi, ST., M.Eng.
Dr. Ir. Margo Pujiantara, MT.

ELECTRICAL ENGINEERING DEPARTMENT
Faculty of Industrial Technology
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya 2015

**ANALISIS KESTABILAN TRANSIEN DAN PELEPASAN
BEBAN PADA SISTEM INTEGRASI 33 KV
PT. PERTAMINA RU IV CILACAP AKIBAT
PENAMBAHAN BEBAN RFCC DAN PLBC**

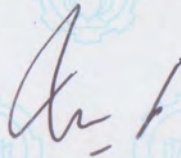
TUGAS AKHIR

**Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada
Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga
Jurusan Teknik Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

Menyetujui :

Dosen Pembimbing I,

Dosen Pembimbing II,



Dr. Eng. Ardyono Priyadi, ST., M.Eng.

NIP. 197309271998031004

Dr. Ir. Margo Pujiantara, MT.

NIP. 196603181990101001



Analisis Kestabilan Transien dan Pelepasan Beban pada Sistem Integrasi 33 KV PT. Pertamina RU IV Cilacap Akibat Penambahan Beban RFCC dan PLBC

Nama : Firdaus Ariansyah
NRP : 2213106062
Dosen Pembimbing : 1. Dr. Eng. Ardyono Priyadi, ST., M.Eng.
2. Dr. Ir. Margo Pujiantara, MT.

ABSTRAK

Keseimbangan daya antara kebutuhan beban dengan kapasitas pembangkitan generator merupakan salah satu parameter dari kestabilan operasi sistem tenaga listrik. Namun dalam pengoperasian sistem tenaga listrik akan selalu terjadi perubahan beban sehingga pembangkit perlu menyesuaikan daya keluarannya melalui governor maupun pengaturan eksitasi. Hal ini perlu dilakukan agar kestabilan sistem tetap terjaga. Kestabilan sistem adalah kemampuan sistem tenaga listrik untuk mempertahankan sinkronisasi dan keseimbangan daya pembangkitan dengan daya pembebanan dalam sistem. Dalam keadaan ini, semua generator berputar pada kecepatan sinkron. Gangguan-gangguan besar yang terjadi secara tiba-tiba seperti lepasnya pembangkit, *starting motor* daya besar, dan hubung singkat mampu mengakibatkan percepatan ataupun perlambatan putaran rotor sehingga hilangnya sinkronisasi dapat terjadi pada sistem.

Adanya penambahan beban pada sistem kelistrikan di PT Pertamina RU IV Cilacap mengakibatkan penambahan pembangkit dan pabrik baru. Akibatnya sistem kelistrikan di PT Pertamina RU IV Cilacap berubah karena perlu menambahkan sistem bus 33 kV.

Untuk mengetahui batas kestabilan yang baik pada sistem kelistrikan suatu industri, maka ditetapkan standar batas kemampuan normal frekuensi, tegangan, dan sudut rotor. Standar yang digunakan mengacu pada IEEE Std C37.106-2003 (Revisi dari ANSI/IEEE C37.106-1987) mengenai pengamanan frekuensi abnormal turbin dengan menggunakan metode pelepasan beban.

Kata Kunci: Kestabilan Transien, Pelepasan Beban, PT Pertamina RU IV Cilacap

Analisis Kestabilan Transien dan Pelepasan Beban pada Sistem Integrasi 33 KV PT. Pertamina RU IV Cilacap Akibat Penambahan Beban RFCC dan PLBC

Nama : Firdaus Ariansyah
NRP : 2213106062
Dosen Pembimbing : 1. Dr. Eng. Ardyono Priyadi, ST., M.Eng.
2. Dr. Ir. Margo Pujiantara, MT.

ABSTRAK

Keseimbangan daya antara kebutuhan beban dengan kapasitas pembangkitan generator merupakan salah satu parameter dari kestabilan operasi sistem tenaga listrik. Namun dalam pengoperasian sistem tenaga listrik akan selalu terjadi perubahan beban sehingga pembangkit perlu menyesuaikan daya keluarannya melalui governor maupun pengaturan eksitasi. Hal ini perlu dilakukan agar kestabilan sistem tetap terjaga. Kestabilan sistem adalah kemampuan sistem tenaga listrik untuk mempertahankan sinkronisasi dan keseimbangan daya pembangkitan dengan daya pembebanan dalam sistem. Dalam keadaan ini, semua generator berputar pada kecepatan sinkron. Gangguan-gangguan besar yang terjadi secara tiba-tiba seperti lepasnya pembangkit, *starting motor* daya besar, dan hubung singkat mampu mengakibatkan percepatan ataupun perlambatan putaran rotor sehingga hilangnya sinkronisasi dapat terjadi pada sistem.

Adanya penambahan beban pada sistem kelistrikan di PT Pertamina RU IV Cilacap mengakibatkan penambahan pembangkit dan pabrik baru. Akibatnya sistem kelistrikan di PT Pertamina RU IV Cilacap berubah karena perlu menambahkan sistem bus 33 kV.

Untuk mengetahui batas kestabilan yang baik pada sistem kelistrikan suatu industri, maka ditetapkan standar batas kemampuan normal frekuensi, tegangan, dan sudut rotor. Standar yang digunakan mengacu pada IEEE Std C37.106-2003 (Revisi dari ANSI/IEEE C37.106-1987) mengenai pengamanan frekuensi abnormal turbin dengan menggunakan metode pelepasan beban.

Kata Kunci: Kestabilan Transien, Pelepasan Beban, PT Pertamina RU IV Cilacap

Transient Stability Analysis and Load Shedding at 33 KV Integrated System of PT. Pertamina RU IV Cilacap due to The Addition of RFCC and PLBC Load

Name : Firdaus Ariansyah
NRP : 2213106062
Advisor : 1. Dr. Eng. Ardyono Priyadi, ST., M.Eng.
2. Dr. Ir. Margo Pujiantara, MT.

ABSTRACT

The Balance of electrical power between load and generation capacity is one of the parameter in electrical stability operation. But in its daily operation there is increase or decrease of load so the generation must appropriate the electrical power by the governor or excitation. This should be do to keep the system balancing. The balance of electrical power can be definite as an ability of electrical power system to keep the synchronize of and power balance with load power. In this situation all the generation rotate in its synchronous speed. The large disturbance as a generation shedding, large power motor starting and short circuit can decrease or increase the rotor speed and effect to the lost synchronize of the system.

Due to the addition of load at the PT. Pertamina RU IV Cilacap electrical system, new generation and plant has been added to the system. The effect is PT Pertamina RU IV Cilacap electrical system change into 33 KV integrated system.

The proper limit of the stability at the electrical system of an industrial plant, the standard of frequency, voltage and rotor angle must have a reference. The reference standard is IEEE Std C37.106-2003 (Rev of ANSI/IEEE C37.106-1987) abnormal frequency of steam turbine with load shedding mechanism.

Keywords : Transient Stability, Load Shedding, PT Pertamina RU IV Cilacap

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah Robbil 'Alamin terucap syukur kehadiran Allah SWT, yang mana atas rahmat dan hidayah-Nya maka penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir dengan judul :

“ANALISIS KESTABILAN TRANSIEN PADA SISTEM INTEGRASI 33 KV PT. PERTAMINA RU IV CILACAP AKIBAT PENAMBAHAN BEBAN RFCC DAN PLBC”

Tugas Akhir ini merupakan karya tulis ilmiah yang menjadi salah satu persyaratan untuk mendapatkan gelar Sarjana Teknik pada bidang studi Teknik Sistem Tenaga, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Dalam kesempatan ini penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada :

1. Ayah, ibu, ketiga kakak dan keluarga atas limpahan doa, kasih sayang, dan teladan hidup bagi penulis.
2. Bapak Dr. Eng. Ardyono Priyadi, ST., M.Eng. dan Bapak Dr. Ir. Margo Pujiantara, MT selaku dosen pembimbing yang telah banyak memberikan saran serta bimbingan.
3. Teman teman GDTL 2K10 divisi dota, pes, futsal, pump, entrepreneur, special event, mountaineering, dan engineering, yang ada di seluruh Indonesia maupun yang ada di basecamp.
4. Teman teman LJ Genap atas dukungan selama 2 tahun ini.
5. Asisten LIPIST atas segala bentuk bantuan yang diberikan.
6. Seluruh keluarga besar Teknik Elektro ITS Surabaya.

Penulis menyadari bahwa penulisan laporan Tugas Akhir ini belum sempurna. Kritik dan saran pembaca diharapkan mampu memperbaiki laporan ini. Semoga Tugas Akhir ini dapat bermanfaat bagi penulis serta pembaca secara luas. Terima kasih.

Surabaya, Desember 2015

Firdaus Ariansyah



(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN JURUSAN	iii
ABSTRAK	v
ABSTRACT	vii
KATA PENGANTAR	ix
DAFTAR ISI	xi
DAFTAR GAMBAR	xv
DAFTAR TABEL	xvii

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	1
1.3 Batasan Masalah	2
1.4 Tujuan	2
1.5 Metodologi	2
1.6 Sistematika Penulisan	4
1.7 Relevansi	4

BAB II KESTABILAN SISTEM TENAGA LISTRIK

2.1 Kestabilan Sistem	5
2.2 Kestabilan Transien	5
2.3 Klasifikasi Kestabilan	8
2.3.1 Kestabilan Sudut Rotor (<i>Rotor Angle Stability</i>)	9
2.3.1.1 Kestabilan Sudut Rotor Gangguan Kecil (<i>Small Disturbance Angle Stability</i>)	10
2.3.1.2 Kestabilan Sudut Rotor Gangguan Besar (<i>Large Disturbance Angle Stability</i>)	10
2.3.2 Kestabilan Frekuensi (<i>Frequency Stability</i>)	10
2.3.3 Kestabilan Tegangan (<i>Voltage Stability</i>)	12
2.3.3.1 Kestabilan Tegangan Gangguan Kecil (<i>Small Disturbance Voltage Stability</i>)	13

2.3.3.2 Kestabilan Tegangan Gangguan Besar (<i>Large Disturbance Voltage Stability</i>).....	13
2.3.3.2.1 Kestabilan Tegangan Jangka Pendek (<i>Short Term Voltage Stability</i>).....	13
2.3.3.2.2 Kestabilan Tegangan Jangka Panjang (<i>Long Term Voltage Stability</i>).....	14
2.4 Standar Kestabilan Sistem.....	15
2.4.1 Standar Kemampuan Frekuensi Abnormal Turbin	16
2.4.2 Standar Batas Operasi Tegangan	17
2.4.3 Standar Pelepasan Beban	18

BAB III SISTEM KELISTRIKAN PT PERTAMINA RU IV CILACAP

3.1 Sistem Kelistrikan PT Pertamina RU IV Cilacap.....	21
3.2 Jumlah Total Pembangkitan, Pembebanan dan <i>Demand</i>	21
3.3 Kapasitas Pembangkitan	22
3.4 Sistem Distribusi di PT Pertamina RU IV Cilacap.....	23
3.6 Motor Induksi.....	24
3.7 Penambahan Pembangkit dan Pabrik Baru.....	25

BAB IV SIMULASI DAN ANALISIS KESTABILAN TRANSIEN

4.1 Pemodelan Sistem Kelistrikan PT Pertamina RU IV Cilacap	29
4.2 Perencanaan Studi Kasus PT Pertamina RU IV Cilacap	29
4.3 Simulasi Kestabilan Transien	30
4.3.1 Simulasi Kestabilan Transien Generator Lepas	30
4.3.1.1 TS1	30
4.3.1.1.1 Generator 51G2 Trip	30
4.3.1.1.2 Generator 051G102 Trip	32
4.3.1.1.2.1 Generator 051G102 Trip + <i>Load Shedding I</i>	34
4.3.1.1.2.2 Generator 051G102 Trip + <i>Load Shedding Status</i>	35
4.3.1.2 TS 2	37
4.3.1.2.1 Generator 51G2 Trip	37

4.3.1.2.2 Generator 152G501A Trip	38
4.3.1.2.2.1 Generator 152G501A Trip + Load Shedding I	40
4.3.1.2.2.2 Generator 152G501A Trip + Load Shedding Status	42
4.3.1.2.3 Generator 051G102 Trip	43
4.3.1.2.3.1 Generator 051G102 Trip + Load Shedding I	45
4.3.1.2.3.2 Generator 051G102 Trip + Load Shedding Status	47
4.3.1.3 TS 3	48
4.3.1.3.1 Generator 51G2 Trip	48
4.3.1.3.2 Generator 152G501A Trip	50
4.3.1.3.3 Generator 051G102 Trip	51
4.3.1.3.3.1 Generator 051G102 Trip + Load Shedding I	53
4.3.1.3.3.2 Generator 051G102 Trip + Load Shedding Status	54
4.3.1.4 TS 4	48
4.3.1.4.1 Generator 51G2 Trip	56
4.3.1.4.1.1 Generator 51G2 Trip + Load Shedding I	57
4.3.1.4.1.2 Generator 051G102 Trip + Load Shedding Status	59
4.3.1.4.2 Generator 152G501A Trip	61
4.3.1.4.2.1 Generator 152G501A Trip + Load Shedding I	62
4.3.1.4.2.2 Generator 152G501A Trip + Load Shedding II	64
4.3.1.4.2.3 Generator 152G501A Trip + Load Shedding Status	65
4.3.1.4.3 Generator 051G102 Trip	67
4.3.1.4.3.1 Generator 051G102 Trip + Load Shedding I	68

4.3.1.4.3.2 Generator 051G102 Trip + <i>Load Shedding II</i>	70
4.3.1.4.3.3 Generator 051G102 Trip + <i>Load Shedding Status</i>	71
4.3.2 Simulasi Kestabilan Transien <i>Motor Starting</i>	73
4.3.2.1 TS MS 1	73
4.3.2.2 TS MS 2	75
4.4 Rekapitulasi Data Kestabilan Transien di PT Pertamina RU IV Cilacap.....	77
BAB V PENUTUP	
5.1 Kesimpulan	79
5.2 Saran.....	79
DAFTAR PUSTAKA	81
LAMPIRAN	83
BIODATA PENULIS	91

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1	Flowchart Tugas Akhir	3
Gambar 2.1	Garis besar sistem tenaga listrik	6
Gambar 2.2	Perilaku generator saat terjadi gangguan	7
Gambar 2.3	Klasifikasi kestabilan sistem tenaga listrik	9
Gambar 2.4	Blok Diagram Konsep Dasar <i>Speed Governor</i>	11
Gambar 2.5	Standar batas operasi turbin uap (<i>Over/Under Frequency</i>).....	16
Gambar 2.6	Standar batas operasi gas turbin (<i>Over/Under Frequency</i>).....	17
Gambar 2.7	Standar batas operasi tegangan kestabilan transien	18
Gambar 4.1	Respon Frekuensi ketika generator 51G2 lepas dari sistem.....	31
Gambar 4.2	Respon Tegangan ketika generator 51G2 lepas dari sistem.....	31
Gambar 4.3	Respon Sudut Rotor ketika generator 51G2 lepas dari sistem.....	32
Gambar 4.4	Respon Frekuensi ketika generator 051G102 lepas dari sistem.....	32
Gambar 4.5	Respon Tegangan ketika generator 051G102 lepas dari sistem.....	33
Gambar 4.6	Respon Sudut Rotor ketika generator 051G102 lepas dari sistem.....	33
Gambar 4.7	Respon Frekuensi ketika generator 051G102 lepas dari sistem dan <i>load shedding I</i>	34
Gambar 4.8	Respon Tegangan ketika generator 051G102 lepas dari sistem dan <i>load shedding I</i>	34
Gambar 4.9	Respon Sudut Rotor ketika generator 051G102 lepas dari sistem dan <i>load shedding I</i>	35
Gambar 4.11	Respon Tegangan ketika generator 051G102 lepas dari sistem dan <i>load shedding status</i>	35
Gambar 4.10	Respon Frekuensi ketika generator 051G102 lepas dari sistem dan <i>load shedding status</i>	36
Gambar 4.12	Respon Sudut Rotor ketika generator 051G102 lepas dari sistem dan <i>load shedding status</i>	36
Gambar 4.13	Respon Frekuensi ketika generator 51G2 lepas dari sistem.....	37

Gambar 4.14 Respon Tegangan ketika generator 51G2 lepas dari sistem	37
Gambar 4.15 Respon Sudut Rotor ketika generator 51G2 lepas dari sistem	38
Gambar 4.16 Respon Frekuensi ketika generator 152-G-501A lepas dari sistem	38
Gambar 4.17 Respon Tegangan ketika generator 152-G-501A lepas dari sistem	39
Gambar 4.18 Respon Sudut Rotor ketika generator 152-G-501A lepas dari sistem	39
Gambar 4.19 Respon Frekuensi ketika generator 152-G-501A lepas dari sistem dan <i>load shedding I</i>	40
Gambar 4.20 Respon Tegangan ketika generator 152-G-501A lepas dari sistem dan <i>load shedding I</i>	41
Gambar 4.21 Respon Sudut Rotor ketika generator 152-G-501A lepas dari sistem dan <i>load shedding I</i>	41
Gambar 4.22 Respon Frekuensi ketika generator 152-G-501A lepas dari sistem dan <i>load shedding status</i>	42
Gambar 4.23 Respon Tegangan ketika generator 152-G-501A lepas dari sistem dan <i>load shedding status</i>	42
Gambar 4.24 Respon Sudut Rotor ketika generator 152-G-501A lepas dari sistem dan <i>load shedding status</i>	43
Gambar 4.25 Respon Frekuensi ketika generator 051G102 lepas dari sistem	43
Gambar 4.26 Respon Tegangan ketika generator 051G102 lepas dari sistem	44
Gambar 4.27 Respon Sudut Rotor ketika generator 051G102 lepas dari sistem	44
Gambar 4.28 Respon Frekuensi ketika generator 051G102 lepas dari sistem dan <i>load shedding I</i>	45
Gambar 4.29 Respon Tegangan ketika generator 051G102 lepas dari sistem dan <i>load shedding I</i>	46
Gambar 4.30 Respon Sudut Rotor ketika generator 051G102 lepas dari sistem dan <i>load shedding I</i>	46
Gambar 4.31 Respon Frekuensi ketika generator 051G102 lepas dari sistem dan <i>load shedding status</i>	47
Gambar 4.32 Respon Tegangan ketika generator 051G102 lepas dari sistem dan <i>load shedding status</i>	47

Gambar 4.33 Respon Sudut Rotor ketika generator 051G102 lepas dari sistem dan <i>load shedding status</i>	48
Gambar 4.34 Respon Frekuensi ketika generator 51G2 lepas dari sistem.....	48
Gambar 4.35 Respon Tegangan ketika generator 51G2 lepas dari sistem.....	49
Gambar 4.36 Respon Sudut Rotor ketika generator 51G2 lepas dari sistem.....	49
Gambar 4.37 Respon Frekuensi ketika generator 152G501A lepas dari sistem.....	50
Gambar 4.38 Respon Tegangan ketika generator 152G501A lepas dari sistem.....	50
Gambar 4.39 Respon Sudut Rotor ketika generator 152G501A lepas dari sistem	51
Gambar 4.40 Respon Frekuensi ketika generator 051G102 lepas dari sistem.....	51
Gambar 4.41 Respon Tegangan ketika generator 051G102 lepas dari sistem.....	52
Gambar 4.42 Respon Tegangan ketika generator 051G102 lepas dari sistem.....	52
Gambar 4.43 Respon Frekuensi ketika generator 051G102 lepas dari sistem dan <i>load shedding I</i>	53
Gambar 4.44 Respon Tegangan ketika generator 051G102 lepas dari sistem dan <i>load shedding I</i>	53
Gambar 4.45 Respon Sudut Rotor ketika generator 051G102 lepas dari sistem dan <i>load shedding I</i>	54
Gambar 4.46 Respon Frekuensi ketika generator 051G102 lepas dari sistem dan <i>load shedding status</i>	54
Gambar 4.47 Respon Tegangan ketika generator 051G102 lepas dari sistem dan <i>load shedding status</i>	55
Gambar 4.48 Respon Sudut Rotor ketika generator 051G102 lepas dari sistem dan <i>load shedding status</i>	55
Gambar 4.49 Respon Frekuensi ketika generator 51G2 lepas dari sistem.....	56
Gambar 4.50 Respon Tegangan ketika generator 51G2 lepas dari sistem.....	56
Gambar 4.51 Respon Sudut Rotor ketika generator 51G2 lepas dari sistem.....	57

Gambar 4.52 Respon Frekuensi ketika generator 51G2 lepas dari sistem dan <i>load shedding I</i>	58
Gambar 4.53 Respon Tegangan ketika generator 51G2 lepas dari sistem dan <i>load shedding I</i>	58
Gambar 4.54 Respon Sudut Rotor ketika generator 51G2 lepas dari sistem dan <i>load shedding I</i>	59
Gambar 4.55 Respon Frekuensi ketika generator 51G2 lepas dari sistem dan <i>load shedding status</i>	59
Gambar 4.56 Respon Tegangan ketika generator 51G2 lepas dari sistem dan <i>load shedding status</i>	60
Gambar 4.57 Respon Sudut Rotor ketika generator 51G2 lepas dari sistem dan <i>load shedding status</i>	60
Gambar 4.58 Respon Frekuensi ketika generator 152G501B lepas dari sistem	61
Gambar 4.59 Respon Tegangan ketika generator 152G501B lepas dari sistem	61
Gambar 4.60 Respon Sudut Rotor ketika generator 152G501B lepas dari sistem	62
Gambar 4.61 Respon Frekuensi ketika generator 152G501B lepas dari sistem dan <i>load shedding I</i>	62
Gambar 4.62 Respon Tegangan ketika generator 152G501B lepas dari sistem dan <i>load shedding I</i>	63
Gambar 4.63 Respon Sudut Rotor ketika generator 152G501B lepas dari sistem dan <i>load shedding I</i>	63
Gambar 4.64 Respon Frekuensi ketika generator 152G501B lepas dari sistem dan <i>load shedding II</i>	64
Gambar 4.65 Respon Tegangan ketika generator 152G501B lepas dari sistem dan <i>load shedding II</i>	64
Gambar 4.66 Respon Sudut Rotor ketika generator 152G501B lepas dari sistem dan <i>load shedding II</i>	65
Gambar 4.67 Respon Frekuensi ketika generator 152G501B lepas dari sistem dan <i>load shedding status</i>	65
Gambar 4.68 Respon Tegangan ketika generator 152G501B lepas dari sistem dan <i>load shedding status</i>	66
Gambar 4.69 Respon Sudut Rotor ketika generator 152G501B lepas dari sistem dan <i>load shedding status</i>	66
Gambar 4.70 Respon Frekuensi ketika generator 051G102 lepas dari sistem	67

Gambar 4.71	Respon Tegangan ketika generator 051G102 lepas dari sistem.....	67
Gambar 4.72	Respon Sudut Rotor ketika generator 051G102 lepas dari sistem.....	68
Gambar 4.73	Respon Frekuensi ketika generator 051G102 lepas dari sistem dan <i>load shedding I</i>	68
Gambar 4.74	Respon Tegangan ketika generator 051G102 lepas dari sistem dan <i>load shedding I</i>	69
Gambar 4.75	Respon Sudut Rotor ketika generator 051G102 lepas dari sistem dan <i>load shedding I</i>	69
Gambar 4.76	Respon Frekuensi ketika generator 051G102 lepas dari sistem dan <i>load shedding II</i>	70
Gambar 4.77	Respon Tegangan ketika generator 051G102 lepas dari sistem dan <i>load shedding II</i>	70
Gambar 4.78	Respon Sudut Rotor ketika generator 051G102 lepas dari sistem dan <i>load shedding II</i>	71
Gambar 4.79	Respon Frekuensi ketika generator 051G102 lepas dari sistem dan <i>load shedding status</i>	71
Gambar 4.80	Respon Tegangan ketika generator 051G102 lepas dari sistem dan <i>load shedding status</i>	72
Gambar 4.81	Respon Sudut Rotor ketika generator 051G102 lepas dari sistem dan <i>load shedding status</i>	72
Gambar 4.82	Respon Frekuensi ketika motor 260K101/102AM terhubung ke sistem.....	73
Gambar 4.83	Respon Tegangan ketika motor 260K101/102AM terhubung ke sistem.....	74
Gambar 4.84	Respon Sudut Rotor ketika motor 260K101/102AM terhubung ke sistem.....	74
Gambar 4.85	Respon Frekuensi ketika motor 014K102ABCM terhubung ke sistem.....	75
Gambar 4.86	Respon Tegangan ketika motor 014K102ABCM terhubung ke sistem.....	76
Gambar 4.87	Respon Sudut Rotor ketika motor 014K102ABCM terhubung ke sistem.....	76



Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Standar Pelepasan Beban 3 Langkah (50 Hz)	19
Tabel 2.2	Standar Pelepasan Beban 6 Langkah (50 Hz)	19
Tabel 3.1	Total Pembangkitan, Pembebanan Dan <i>Demand</i>	21
Tabel 3.2	Data Kapasitas Pembangkit di PT Pertamina RU IV Cilacap.....	22
Tabel 3.3	Data Kapasitas Pembangkit Tiap <i>Utility</i> di PT. Pertamina RU IV Cilacap	23
Tabel 3.4	Data Transformator di PT. Pertamina RU IV Cilacap.....	24
Tabel 3.5	Data Kapasitas <i>Generation Bus</i> di PT. Pertamina RU IV Cilacap.....	24
Tabel 3.6	Data motor di PT. Pertamina RU IV Cilacap	25
Tabel 3.7	Data Pembangkit Baru di PT. Pertamina RU IV Cilacap..	25
Tabel 3.8	Data Beban PLBC di PT. Pertamina RU IV Cilacap.....	25
Tabel 3.9	Data Beban di PT. Pertamina RU IV Cilacap	26
Tabel 4.1	Rekapitulasi Data Studi Kasus Generator Lepas	77
Tabel 4.2	Rekapitulasi Data Studi Kasus <i>Motor Starting</i>	78



(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang Masalah

Keseimbangan daya antara kebutuhan beban dengan kapasitas pembangkitan generator merupakan salah satu parameter dari kestabilan operasi sistem tenaga listrik. Namun dalam pengoperasian sistem tenaga listrik akan selalu terjadi perubahan beban sehingga pembangkit perlu menyesuaikan daya keluarannya melalui governor maupun pengaturan eksitasi. Hal ini perlu dilakukan agar kestabilan sistem tetap terjaga.

Semakin berkembangnya sistem tenaga listrik di industri maka semakin kompleks pula masalah yang akan dihadapi. Masalah seperti adanya gangguan dari lepasnya generator, gangguan hubung singkat, *starting motor* ataupun efek dari perubahan beban yg mendadak akan menyebabkan sistem keluar dari daerah kestabilannya. Kecepatan pembangkit memberi reaksi terhadap perubahan yang terjadi pada sistem menjadi faktor penentu dari kestabilan sistem. Kestabilan mesin pembangkit sangat bergantung pada kemampuan sistem kendalinya, dimana sistem kendali dikatakan handal apabila mampu mengendalikan mesin tetap beroperasi dalam keadaan normal dan berada di daerah kestabilannya meskipun sistem mengalami gangguan.

Pada situasi dimana adanya penambahan kapasitas pembangkit dengan daya cukup besar atau beban besar hilang dari sistem atau bahkan terjadi gangguan pada saluran transmisi, stabilitas sistem harus cukup kuat untuk mempertahankan diri terhadap perubahan beban yang relatif besar, dimana ini akan berdampak pada keseimbangan sistem. Ketidakseimbangan ini akan menyebabkan adanya perubahan pada kestabilan sistem terutama kestabilan frekuensi, kestabilan tegangan dan kestabilan sudut rotor. Karena kestabilan di kelistrikan industri berkaitan dengan kemampuan sistem dalam mempertahankan kondisi kestabilan sehingga peralatan dapat bekerja dengan baik dan memiliki efisiensi tinggi, jadi perlu dilakukan adanya penanganan khusus untuk menjaga sistem tetap dalam keadaan stabil saat terjadi gangguan, salah satunya yaitu mekanisme pelepasan beban atau *load shedding*.

1.2. Perumusan Masalah

Permasalahan yang akan dibahas pada Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut :

1. Bagaimana pola operasi pada sistem kelistrikan PT Pertamina RU IV Cilacap.
2. Bagaimana respon frekuensi, tegangan, dan sudut rotor di PT Pertamina RU IV Cilacap saat dilakukan analisis kestabilan transient.
3. Bagaimana merancang mekanisme pelepasan beban (*load shedding*) yang sesuai pada PT Pertamina RU IV Cilacap.

1.3. Batasan Masalah

Batasan – batasan yang digunakan untuk menyelesaikan permasalahan pada Tugas Akhir ini antara lain :

1. Analisis kestabilan transient PT Pertamina RU IV Cilacap dilakukan dengan memperhatikan respon sistem yang meliputi respon frekuensi, tegangan dan sudut rotor akibat gangguan yang diberikan berupa lepasnya generator, dan starting motor.
2. Skema perbaikan sistem kelistrikan yang dilakukan menggunakan skema pelepasan beban (*load shedding*)
3. Perangkat lunak yang digunakan adalah ETAP 12.6

1.4. Tujuan

Tujuan yang ingin dicapai pada Tugas Akhir ini adalah :

1. Melakukan studi kestabilan transien di PT Pertamina RU IV Cilacap untuk mendapatkan rekomendasi yang sesuai sehingga diperoleh stabilitas yang layak dan mampu mengatasi gangguan yang terjadi.
2. Merancang suatu skema pelepasan beban yang handal agar sistem kelistrikan di PT Pertamina RU IV Cilacap dapat mempertahankan kestabilan sistem saat terjadi gangguan.

1.5. Metodologi

Metodologi yang digunakan pada Tugas Akhir ini meliputi beberapa tahap sebagai berikut :

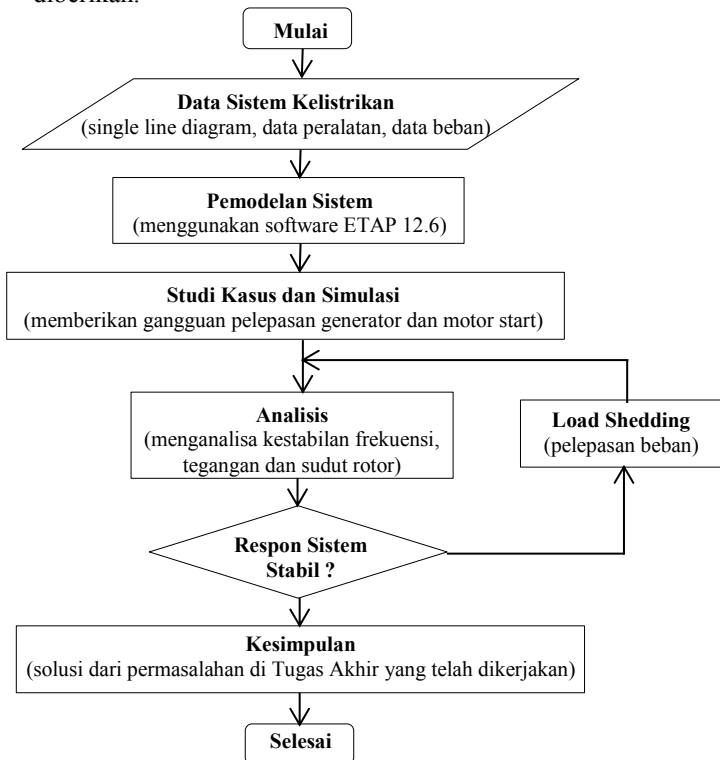
1. Studi Literatur
Mengumpulkan referensi mengenai Analisis Sistem Tenaga yang dilakukan analisis kestabilan transien dan mekanisme pelepasan beban.

2. Pengumpulan Data

Data yang dibutuhkan dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini adalah data sistem kelistrikan PT Pertamina RU IV Cilacap.

3. Pengolahan Data

Menganalisis *single line diagram* dari sistem kelistrikan PT Pertamina RU IV Cilacap. Selanjutnya melakukan simulasi gangguan transient berupa lepasnya generator, short circuit, dan motor starting menggunakan *software* ETAP 12.6 Data yang akan dianalisis adalah respon kestabilan transien yang meliputi respon frekuensi, respon tegangan dan respon sudut rotor. Apabila sistem belum stabil maka perlu dilakukan mekanisme pelepasan beban atau *load shedding* sesuai studi kasus yang diberikan.



Gambar 1.1 Flowchart Tugas Akhir

4. Kesimpulan
Memberikan kesimpulan dan saran mengenai kondisi kestabilan transient di PT Pertamina RU IV Cilacap.

1.6. Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan dalam Tugas Akhir ini terdiri atas lima bab dengan uraian sebagai berikut :

1. BAB I Pendahuluan
Pada bab ini membahas tentang latar belakang, permasalahan, batasan masalah, tujuan, metode penelitian, sistematika penulisan, dan relevansi pada Tugas Akhir ini.
2. BAB II Kestabilan Sistem Tenaga Listrik
Pada bab ini membahas konsep dan penjelasan tentang kestabilan transient dan mekanisme pelepasan beban.
3. BAB III Sistem Kelistrikan PT Pertamina RU IV Cilacap
Pada bab ini membahas sistem kelistrikan di PT Pertamina RU IV Cilacap yang meliputi spesifikasi generator, trafo, beban, dan rating tegangan.
4. BAB IV Simulasi dan Analisis Kestabilan Transien
Pada bab ini membahas data hasil simulasi mengenai kestabilan transien pada sistem berupa respon frekuensi, respon tegangan dan respon sudut rotor dan hasil setelah dilakukan mekanisme pelepasan beban.
5. BAB V Penutup
Pada bab ini membahas kesimpulan dan saran dari Tugas Akhir yang telah dikerjakan.

1.7. Relevansi

Hasil yang diperoleh dari Tugas Akhir ini diharapkan dapat memberikan manfaat sebagai berikut :

1. Dapat digunakan sebagai acuan atau referensi untuk melakukan mekanisme pelepasan beban dalam menangani masalah kestabilan transient di PT Pertamina RU IV Cilacap
2. Dapat digunakan sebagai referensi untuk penelitian mengenai kestabilan transient dan pelepasan beban selanjutnya.

BAB II

KESTABILAN SISTEM TENAGA LISTRIK

2.1. Sistem Tenaga Listrik

Suatu sistem tenaga listrik terdiri dari tiga bagian utama, yaitu pembangkit listrik, saluran transmisi dan sistem distribusi. Keseimbangan daya antara kebutuhan beban dengan kapasitas pembangkitan generator merupakan salah satu parameter dari kestabilan operasi sistem tenaga listrik. Namun dalam pengoperasian sistem tenaga listrik akan selalu terjadi perubahan beban sehingga pembangkit perlu menyesuaikan daya keluarannya melalui governor maupun pengaturan eksitasi. Hal ini perlu dilakukan agar kestabilan sistem tetap terjaga.

2.2. Kestabilan Transien

Dalam keadaan operasi sistem tenaga listrik yang normal terdapat keseimbangan antara daya mekanis pada *prime mover* dengan daya listrik atau beban pada sistem. Dalam keadaan seimbang, daya mekanik dan daya elektrik bergerak secara bersamaan dengan kecepatan konstan. Ketika terjadi gangguan, maka terjadi perbedaan daya elektrik dan mekanik dari generator. Kelebihan daya elektrik membuat perlambatan putaran rotor generator, hal ini disebabkan semakin terbebaninya generator. Namun kelebihan daya mekanik membuat percepatan pada putaran rotor, hal ini disebabkan semakin ringan beban yang ditanggung generator. Bila gangguan tidak segera dihilangkan, maka perlambatan atau percepatan putaran rotor generator mengakibatkan hilangnya sinkronisasi dalam suatu sistem. Maka dari itu diperlukan analisis kestabilan agar pembangkit yang terganggu tidak lepas dari sistem [1].

Stabilitas sistem tenaga listrik adalah kemampuan sistem tenaga listrik untuk mempertahankan sinkronisasi dan keseimbangan dalam sistem. Batas stabilitas sistem adalah daya maksimum yang mengalir melalui suatu titik dalam sistem tanpa menyebabkan hilangnya stabilitas.

Berdasarkan sifat gangguannya, masalah stabilitas sistem tenaga listrik dibedakan atas [2] :

1. Stabilitas steady state

Adalah kemampuan suatu sistem tenaga listrik mempertahankan suatu sistem setelah mengalami gangguan kecil atau fluktuasi beban.

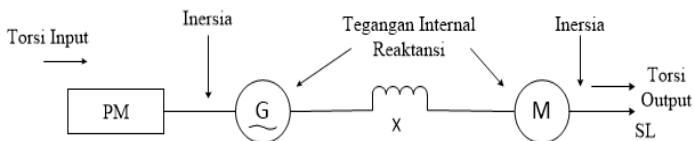
2. Stabilitas transien

Adalah kemampuan suatu sistem tenaga listrik mempertahankan sinkronisasi setelah mengalami gangguan besar yang bersifat mendadak sekitar satu ayunan atau satu *swing* pertama dengan asumsi bahwa pengatur tegangan otomatis (AVR) belum bekerja.

3. Stabilitas dinamik

Adalah apabila setelah ayunan pertama (periode stabilitas transien) sistem mampu mempertahankan sinkronisasi sampai sistem dalam keadaan seimbang yang baru (stabilitas transien bila AVR dan governor bekerja cepat dan diperhitungkan dalam analisa).

Ketidakseimbangan antara daya pembangkit dengan beban menimbulkan suatu keadaan transien yang menyebabkan rotor dari mesin sinkron berayun karena adanya torsi yang mengakibatkan percepatan atau perlambatan pada rotor tersebut. Kehilangan sinkronisasi ini terjadi bila torsi tersebut cukup besar, maka salah satu atau lebih dari mesin sinkron tersebut akan kehilangan sinkronisasinya, misalnya terjadi ketidakseimbangan yang disebabkan adanya daya pembangkit yang berlebihan, maka sebagian besar dari energi yang berlebihan akan diubah menjadi energi kinetik yang mengakibatkan percepatan sudut rotor bertambah besar, walaupun kecepatan rotor bertambah besar, tidak berarti bahwa sinkronisasi dari mesin tersebut akan hilang, faktor yang menentukan adalah perbedaan sudut rotor atau daya tersebut diukur terhadap referensi putaran sinkronisasi. Berikut pada Gambar 2.1 merupakan gambar sistem kelistrikan secara umum mulai dari daya pembangkitan hingga ke beban listrik [2].



Gambar 2.1 Garis besar sistem tenaga listrik

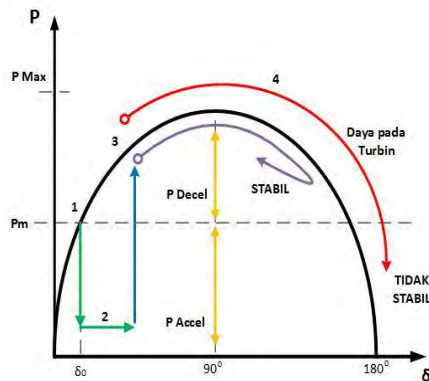
Faktor-faktor utama dalam masalah stabilitas adalah:

1) Faktor mekanis :

a) Torsi input *prime* beban

- b) Inersia dari *prime mover* dan generator
 - c) Inersia motor dan sumbu beban
 - d) Torsi input sumbu beban
- 2) Torsi elektris :
- a) Tegangan internal dari generator sinkron
 - b) Reaktansi sistem
 - c) Tegangan internal dari motor sinkron

Jika terjadi gangguan besar pada sistem tenaga listrik maka akan mempengaruhi kinerja generator sehingga putaran rotor generator dapat mengalami fluktuasi kecepatan. Pada Gambar 2.2 merupakan respon generator ketika sistem mengalami gangguan [3].



Gambar 2.2 Perilaku generator saat terjadi gangguan

Pada titik kerja awal (sebelum terjadi gangguan), dapat diketahui bahwa timbulnya gangguan seketika mengakibatkan daya *output* generator turun secara drastis. Selisih antara daya *output* listrik tersebut dan daya mekanis turbin mengakibatkan rotor generator mengalami percepatan, sehingga sudut rotor/daya bertambah besar. Ketika gangguan hilang, daya *output* generator pulih kembali pada harga yang sesuai dengan kurva $p-\delta$ di atas.

Setelah gangguan hilang, daya *output* generator menjadi lebih besar daripada daya mekanis turbin. Hal ini mengakibatkan perlambatan pada rotor generator. Bila terdapat torsi lawan yang cukup setelah gangguan hilang untuk mengimbangi percepatan yang terjadi selama terjadinya gangguan, generator akan stabil setelah ayunan (*swing*) yang

pertama dan kembali ke titik kerjanya dalam waktu kira-kira 0,5 detik. Bila kopel lawan tersebut tidak cukup besar, sudut rotor/daya akan terus bertambah besar sampai sinkronisasi dengan sistem hilang [4].

Pengaruh atau penentuan stabilitas ditentukan dari beberapa faktor-faktor pendukung, antara lain [5]:

- 1) Kapasitas kemampuan alternator, semakin besar daya mampu sistem tersebut maka sistem akan semakin stabil.
- 2) Sifat dan kapasitas beban, pembebanan yang melebihi kapasitas daya pembangkitan akan mempengaruhi kestabilan sistem secara keseluruhan. Pembebanan melebihi kapasitas dalam jangka waktu yang lama juga berpotensi mengganggu kestabilan yang mampu mengakibatkan kegagalan sistem.
- 3) Gangguan: jenis, lama, dan posisi gangguan pada kejadian gangguan satu fasa ke tanah dan gangguan sementara/temporer mempunyai kondisi kestabilan yang lebih baik dibandingkan dengan sistem yang mengalami gangguan lainnya.

Stabilitas sistem tenaga listrik menentukan keandalan sistem. Semakin tinggi stabilitas suatu sistem, maka kestabilan sistem juga akan semakin tinggi. Hal ini juga mempengaruhi umur peralatan pada sistem yang digunakan. Pengoperasian pada kestabilan yang baik tentu berdampak pada perawatan peralatan yang berarti penggantian peralatan akibat kerusakan dapat dihindari sebelum waktunya.

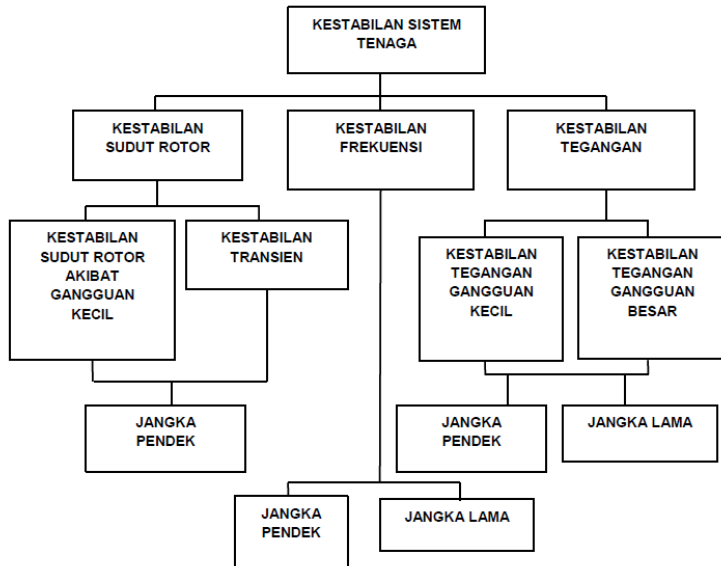
2.3 Klasifikasi Kestabilan

Analisis stabilitas transien termasuk dalam mengidentifikasi faktor-faktor utama yang berkontribusi terhadap ketidakstabilan dan merancang metode untuk meningkatkan operasi yang stabil yang mana sangat dipengaruhi oleh klasifikasi stabilitas dalam kategori yang tepat. Pembagian atau klasifikasi kestabilan tersebut didasarkan pada beberapa pertimbangan, antara lain [3]:

- 1) Parameter yang berpengaruh terhadap kestabilan
- 2) Besar/kecilnya gangguan
- 3) Pertimbangan waktu sebagai parameter kestabilan sistem

Permasalahan kestabilan sebenarnya merupakan suatu permasalahan umum, namun adanya variasi ketidakstabilan sistem mengakibatkan permasalahan kestabilan menjadi lebih kompleks. Oleh

karena itu perlu adanya klasifikasi berkaitan dengan penyelesaian sistem sesuai dengan representasi/analisis yang tepat. Pada Gambar 2.3 dijelaskan mengenai klasifikasi kestabilan sistem tenaga listrik berdasarkan gangguan-gangguan yang mungkin terjadi.



Gambar 2.3 Klasifikasi kestabilan sistem tenaga listrik

Berdasarkan sifat fisik dari fenomena, stabilitas sistem tenaga dapat diklasifikasikan menjadi tiga kategori, yaitu [3]:

- 1) Kestabilan Frekuensi
- 2) Kestabilan Tegangan
- 3) Kestabilan Sudut Rotor

2.3.1 Kestabilan Sudut Rotor (*Rotor Angle Stability*)

Stabilitas sudut rotor mengacu pada kemampuan mesin sinkron yang saling berhubungan/terinterkoneksi untuk tetap berada pada kondisi sinkron setelah mengalami gangguan. Hal ini tergantung pada kemampuan untuk mempertahankan atau mengembalikan keseimbangan antara torsi elektromagnetik dan torsi mekanik setiap mesin sinkron

dalam sistem tersebut. Ketidakstabilan ini dapat mengakibatkan terjadinya peningkatan ayunan sudut beberapa generator sehingga menyebabkan hilangnya sinkronisasi generator satu dengan generator lain. Berdasarkan karakteristik rotornya, kestabilan sudut rotor dibagi menjadi dua, yaitu, berdasarkan referensi [6]:

2.3.1.1 Kestabilan Sudut Rotor Gangguan Kecil (*Small-Disturbance Angle Stability*)

Kestabilan ini berkaitan dengan kemampuan sistem tenaga untuk mempertahankan keadaan sinkron ketika sistem mengalami gangguan kecil. Studi stabilitas transien gangguan kecil ini umumnya terjadi pada rentang waktu 10-20 detik setelah adanya gangguan dan tergantung pada operasi awalnya. Pada keadaan ini, daya *output* generator akan berubah-ubah sesuai dengan perubahan besarnya sudut rotor.

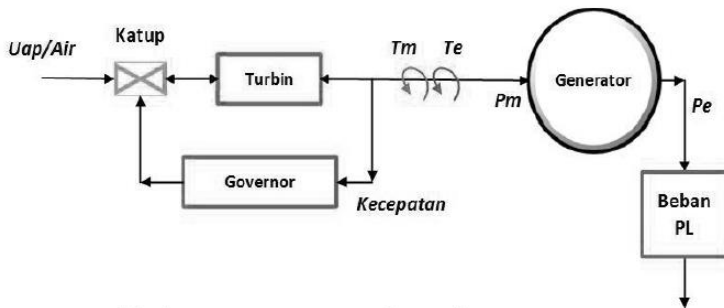
2.3.1.2 Kestabilan Sudut Rotor Gangguan Besar (*Large-Disturbance Angle Stability/Transient Stability*)

Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya bahwa kestabilan berkaitan dengan kemampuan sistem tenaga untuk mempertahankan keadaan sinkron saat mengalami gangguan. Gangguan besar yang dapat terjadi seperti hubung singkat pada saluran transmisi, lepasnya pembangkit dapat mengganggu kerja sistem kelistrikan industri. Respon sudut generator mengalami penyimpangan dan dipengaruhi oleh ketidaklinieran hubungan sudut daya sehingga sistem kehilangan sinkronisasi yang mengakibatkan ketidakstabilan ayunan pertama. Studi stabilitas transien pada keadaan ini terjadi dalam rentang waktu yang singkat yaitu antara 3–5 detik setelah adanya gangguan secara tiba-tiba. Pada sistem kelistrikan yang lebih luas, rentang waktu dapat berkisar antara 10–20 detik setelah gangguan. Kestabilan sudut rotor akibat gangguan kecil dan kestabilan transien tergolong fenomena kestabilan jangka pendek (*short term*).

2.3.2 Kestabilan Frekuensi (*Frequency Stability*)

Kestabilan frekuensi mengacu pada kemampuan sistem untuk tetap mempertahankan nilai frekuensi nominal agar tetap stabil mengikuti perubahan sistem yang berubah secara tiba-tiba akibat ketidakseimbangan pasokan daya pembangkit dengan daya yang diserap

beban. Perputaran turbin sangat erat kaitannya dengan frekuensi sistem tenaga listrik. Apabila turbin berputar melebihi putaran nominalnya, maka torsi putar yang dihasilkan juga semakin besar sehingga frekuensi akan naik dan mampu menimbulkan potensi kerusakan pada pembangkit hingga ke jaringan-jaringan transmisi dan distribusi khususnya industri [6].



Gambar 2.4 Blok Diagram Konsep Dasar *Speed Governor*

Konsep dasar speed governing dapat diilustrasikan pada gambar 2.4 :

T_m = torsi mekanik

P_m = daya mekanik

T_e = torsi elektrik

P_e = daya elektrik

P_L = Daya beban

Saat ada perubahan beban, terjadi perubahan torsi elektrik (T_e) pada generator secara instan. Hal ini menyebabkan perbedaan antara torsi mekanik (T_m) dan torsi elektrik (T_e) yang menyebabkan perbedaan kecepatan.

Daya aktif mempunyai hubungan erat dengan nominal frekuensi pada sistem. *Supply* daya aktif sistem harus sesuai dengan kebutuhan agar frekuensi tetap dalam batas yang aman untuk beroperasi. Penyesuaian daya aktif ini dilakukan dengan mengatur kopel mekanis untuk memutar generator, yang berhubungan dengan pengaturan pemberian daya mekanis ke turbin. Pengaturan pemberian bahan bakar ini dilakukan oleh governor. Governor akan mengurangi kapasitas bahan bakar ketika

frekuensi naik dari nominalnya, dan menambah kapasitas bahan bakar ketika frekuensi turun dari nominalnya.

Mode operasi speed governor dibagi menjadi mode droop dan mode isochronous. Mode droop governor sudah memiliki *set point* daya mekanik yang besarnya sesuai dengan rating generator atau menurut kebutuhan. Dengan adanya *fixed setting*, nilai *output* daya listrik generator akan tetap sehingga perubahan beban tidak mempengaruhi putaran turbin [9]. Pada mode isochronous *set point* putaran governor ditentukan berdasarkan kebutuhan daya pada sistem saat itu secara *real time*. Governor akan menyesuaikan nilai output daya mekanik turbin agar sesuai dengan kebutuhan daya listrik. Caranya dengan mengatur governor berdasarkan *logic control* dari pabrikan generator. Mode ini dapat menjaga frekuensi sistem tetap berada dalam batas yang diizinkan sehingga generator tidak mengalami *loss of synchronization*.

2.3.3 Kestabilan Tegangan (Voltage Stability)

Stabilitas tegangan mengacu pada kemampuan suatu sistem tenaga untuk mempertahankan tegangan pada kondisi stabil pada semua bus dalam sistem tenaga listrik setelah terjadi gangguan dari kondisi operasi awal yang diberikan. Hal ini tergantung pada kemampuan untuk mempertahankan/mengembalikan keseimbangan antara permintaan beban dan suplai beban dari sistem tenaga listrik. Ketidakstabilan frekuensi dapat mengakibatkan terjadinya penurunan atau naiknya tegangan dari beberapa bus. Ketidakstabilan tegangan dapat dipengaruhi karena hilangnya beban pada sistem, hubung singkat saluran transmisi, dan pemadaman secara tiba-tiba. Penurunan secara bertahap dalam tegangan bus juga dapat dikaitkan dengan ketidakstabilan sudut rotor.

Faktor utama yang berkontribusi terhadap ketidakstabilan tegangan adalah adanya *drop* tegangan yang terjadi pada aliran daya aktif dan reaktif melalui reaktansi induktif jaringan transmisi. Hal ini dapat membatasi kemampuan jaringan transmisi untuk mengalirkan daya dan mengurangi besar tegangan. Penyaluran daya dibatasi ketika generator menyentuh batas beban lebih arus jangka. Stabilitas tegangan dapat terancam ketika gangguan meningkatkan daya reaktif permintaan listrik melebihi kapasitas sumber daya reaktif yang tersedia. Kestabilan tegangan dibagi menjadi dua kategori untuk memudahkan identifikasi permasalahan, yaitu [6]:

2.3.3.1 Kestabilan Tegangan Gangguan Kecil (*Small-Disturbance Voltage Stability*)

Kemampuan sistem untuk mempertahankan tegangan pada kondisi stabil akibat gangguan kecil seperti perubahan beban yang tidak menentu. Analisis kestabilan tegangan gangguan kecil menggunakan teknik linear dapat memberikan informasi kestabilan tegangan yang terkait berdasarkan kondisi yang ada sehingga penyebab dan lokasi potensi gangguan dapat ditentukan. Gangguan tegangan kecil dipengaruhi oleh karakteristik beban hingga pengontrolan secara terus-menerus pada sistem tenaga. Konsep ini berguna dalam menentukan bagaimana tegangan merespon perubahan beban-beban kecil.

2.3.3.2 Kestabilan Tegangan Gangguan Besar (*Large-Disturbance Voltage Stability*)

Kemampuan untuk mempertahankan tegangan stabil yang diakibatkan adanya gangguan besar seperti kesalahan sistem, lepasnya generator, dan hubung singkat. Kemampuan ini ditentukan oleh karakteristik sistem dan beban, dan interaksi keduanya. Evaluasi stabilitas biasanya membutuhkan pengujian respon tidak linier (kinerja dinamis) dari sistem tenaga listrik selama periode waktu yang cukup untuk mengamati interaksi peralatan seperti *tap changer* transformator dan arus medan pada generator.

Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya bahwa kestabilan merupakan suatu permasalahan, namun untuk mengidentifikasi lebih rinci mengenai permasalahan yang terjadi dibutuhkan klasifikasi. Klasifikasi kestabilan tegangan berdasarkan waktunya dapat dibagi menjadi 2, yaitu [6]:

2.3.3.2.1 Kestabilan Tegangan Jangka Pendek (*Short Term Voltage Stability*)

Gangguan kestabilan jangka pendek dapat mengakibatkan adanya kedip tegangan (*voltage sags*) hingga kenaikan tegangan (*swells*) pada sistem tenaga listrik [6].

1) Kedip Tegangan (*Voltage Sag*)

Kedip tegangan menurut IEEE *Monitoring Electric Power Quality* Std 1159-1995 didefinisikan sebagai variasi tegangan rms dengan rentang besar tegangan antara 90% sampai 10% dari tegangan nominal dan

berlangsung selama 0,5 *cycle* sampai 1 menit. Kedip tegangan dapat diakibatkan oleh kesalahan sistem awal, namun kasus ini juga dapat disebabkan oleh *switching* beban kapasitas besar atau *starting motor* dengan daya besar seperti motor induksi yang membutuhkan arus *start* sekitar 6–10 kali arus nominal. Kedip tegangan yang berkelanjutan tentu dapat mengakibatkan gangguan proses pada peralatan sistem tenaga sehingga permasalahan ini harus dapat diatasi dengan baik untuk menunjang keandalan sistem tenaga.

2) Kenaikan Tegangan (*Voltage Swell*)

Kenaikan tegangan menurut IEEE *Monitoring Electric Power Quality* Std 1159-1995 didefinisikan sebagai peningkatan tegangan rms atau arus pada frekuensi daya untuk jangka waktu 0,5 *cycle* selama 1 menit. Sama seperti kedip tegangan yang mana dapat disebabkan karena adanya kesalahan sistem awal, namun kasus ini lebih jarang ditemukan pada sistem tenaga listrik. Kenaikan tegangan ini dapat terjadi akibat kegagalan saluran satu fasa ke tanah sehingga sistem mengalami tegangan lebih sementara pada fase yang gagal tersebut. Penyebab lainnya adalah adanya *switching* beban yang cukup besar atau *switching* kapasitor *bank*. Dampak yang berpotensi timbul akibat peningkatan tegangan secara umum adalah terjadinya kegagalan komponen.

2.3.3.2.2 Kestabilan Tegangan Jangka Lama (*Long Term Voltage Stability*)

Gangguan kestabilan jangka lama menurut IEEE *Monitoring Electric Power Quality* Std 1159-1995 didefinisikan sebagai cakupan penyimpangan/deviasi rms pada sistem tenaga selama lebih dari 1 menit. Kasus ini dapat mengakibatkan adanya tegangan lebih (*over voltage*) dan tegangan kurang (*under voltage*) pada sistem tenaga listrik tergantung pada penyebab terjadinya [6]:

1) Tegangan Lebih (*Over Voltage*)

Merupakan peningkatan nilai tegangan rms sebesar lebih dari atau sama dengan 110% (110% - 120%) selama

lebih dari 1 menit. Tegangan lebih umumnya dihasilkan akibat adanya *switching* peralatan seperti pelepasan beban dengan kapasitas daya yang besar, *switching* kapasitor *bank*, dan sebagainya. Faktor lain penyebab tegangan lebih yaitu tegangan sistem yang buruk, pengaturan tegangan yang buruk seperti adanya kemungkinan kesalahan pengaturan *tap* transformator sehingga mengakibatkan kenaikan tegangan.

Akibat dari tegangan lebih tentu berdampak pada peralatan sistem tenaga listrik. Jika pada perangkat elektronik, maka kondisi ini dapat menyebabkan perangkat rusak. Berbeda dengan peralatan sistem tenaga seperti transformator, kabel, bus, *switchgear*, CT, dan PT umumnya tidak mengalami kegagalan seketika. Namun, keadaan tegangan lebih yang berkelanjutan berpotensi mengurangi umur peralatan tersebut. Bahkan apabila terdapat relay pada sebuah sistem, maka operasi yang tidak sesuai rencana dapat saja terjadi.

2) Tegangan Kurang (*Under Voltage*)

Merupakan penurunan nilai tegangan rms sebesar kurang dari atau sama dengan 90% (90% - 80%) selama lebih dari 1 menit. Penyebab *under voltage* merupakan kebalikan dari adanya *over voltage* seperti penambahan beban dengan daya yang besar, penyalan *switching* kapasitor *bank*, dan sebagainya. Berkurangnya besar tegangan juga memiliki dampak terhadap kinerja sistem tenaga listrik. Keadaan ini dapat berpengaruh pada peralatan seperti kontroler motor yang mana secara umum tegangan *drop* yang diizinkan adalah sebesar 70 – 80% dari tegangan nominal. Dampak nyata akibat keadaan ini ialah peningkatan lonjakan arus pada motor yang mengakibatkan tingginya rugi panas, perubahan kecepatan motor induksi, dan sebagainya.

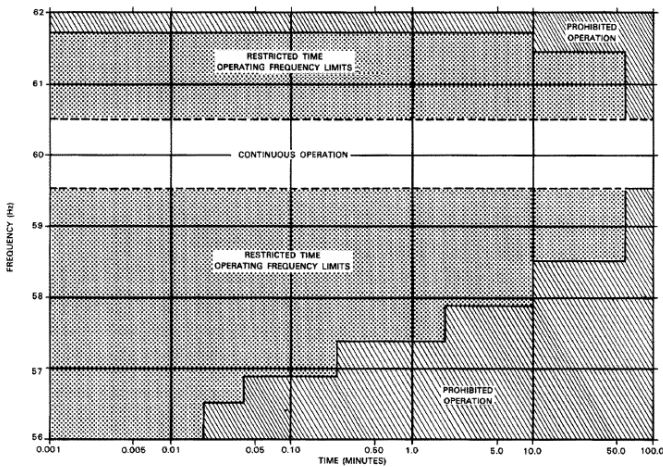
2.4 Standar Kestabilan Transien

Dalam penerapannya, kestabilan transien disimulasikan dengan menggunakan perangkat lunak/*software* untuk mengetahui keadaan sistem sesaat setelah terjadi gangguan. Aturan mengenai kestabilan

transien menggunakan standar internasional sehingga dapat digunakan sebagai acuan untuk analisis sistem tenaga listrik.

2.4.1 Standar Kemampuan Frekuensi Abnormal Turbin

Setiap produsen mampu memberikan karakteristik operasi normal terhadap peralatan yang dibuatnya. Pada turbin uap misalnya, produsen umumnya memiliki data berupa batas kemampuan turbin ketika beroperasi. Batasan ini digunakan sebagai antisipasi perlindungan peralatan sehingga resiko kerusakan dapat dihindari. Gambar 2.5 merupakan standar kemampuan frekuensi abnormal pada turbin uap [6].

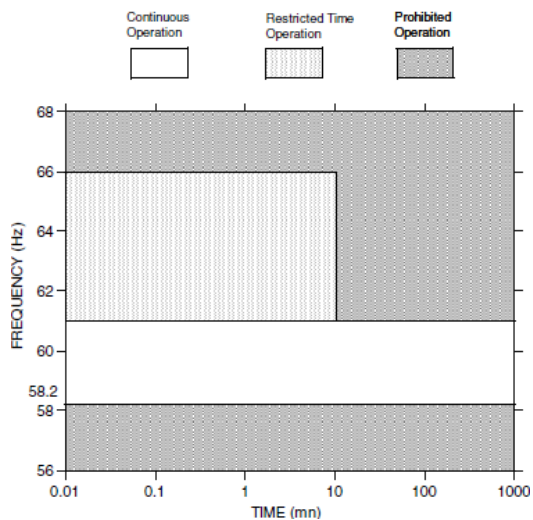


Gambar 2.5 Standar batas operasi turbin uap (*Over/Under Frequency*)

Pada gambar tersebut, batas frekuensi antara 59,5 Hz – 60,5 Hz merupakan batas normal operasi turbin uap. Sedangkan batas frekuensi diatas 60,5 Hz dan dibawah 59,5 Hz adalah batas larangan turbin uap beroperasi. Batas frekuensi yang telah disebutkan sebelumnya merupakan batas frekuensi standar 60 Hz. Jika dikonversi menjadi standar 50 Hz maka 59,5 Hz akan menjadi 49,58 Hz atau sekitar 99,16%. Sedangkan 60 Hz menjadi 50,42 Hz atau sekitar 100,83 Hz. Berdasarkan standar, kejadian *under frequency* dapat mengakibatkan berkurangnya umur sebuah peralatan. *Under frequency* yang pertama pada turbin uap mampu menyebabkan kecepatan putar turbin melemah dan mengurangi siklus kegagalan pada waktu berikutnya. Jika sebuah

unit mampu beroperasi pada frekuensi tertentu selama 1 menit, maka unit tersebut diperbolehkan tetap beroperasi selama 9 menit berikutnya pada frekuensi yang sama hingga melebihi batas umur *blades*.

Standar operasi batas frekuensi dapat berbeda sesuai dengan karakteristik pembangkit yang digunakan. Turbin pembakaran/gas turbin berbeda dengan turbin uap terutama pada media yang digunakan untuk menggerakkan turbin, yaitu adanya proses kompresi udara dan pencampuran dengan bahan bakar sehingga menghasilkan gas buang panas. Gas ini disalurkan menuju turbin yang telah terpasang pada poros. Poros inilah yang berputar untuk menggerakkan generator. Penerapan batas frekuensi bawah memiliki kesamaan dengan penerapan batas frekuensi bawah pada turbin uap. Namun, terdapat perbedaan pada desain turbin serta adanya pembakaran yang mengakibatkan persyaratan perlindungan juga berbeda. Pada Gambar 2.6 berikut ini merupakan standar batas operasi pada gas turbin.

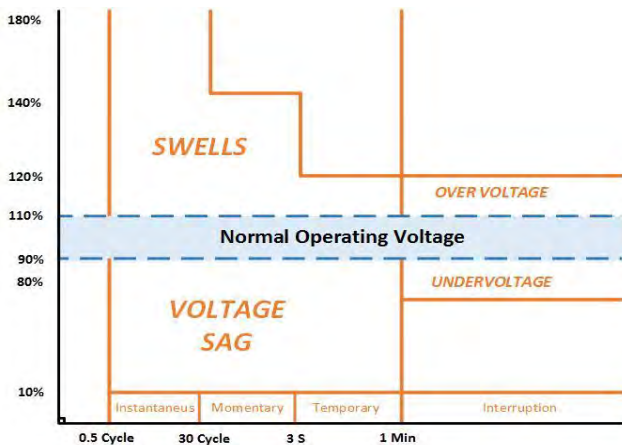


Gambar 2.6 Standar batas operasi gas turbin (*Over/Under Frequency*)

2.4.2 Standar Batas Operasi Tegangan

Perusahaan Listrik Negara (PLN) sebagai penyedia listrik di Indonesia, memiliki standar mengenai batas tegangan operasi yang harus dipenuhi untuk penggunaan di industri. Secara umum proses penyaluran

daya sistem tenaga listrik dilakukan melalui jarak yang cukup jauh sehingga potensi adanya *drop* tegangan dan rugi-rugi transmisi tidak dapat diabaikan. Pada Gambar 2.7 berikut ini merupakan batas operasi normal tegangan pada kondisi transien hingga *steady state* berdasarkan Standar IEEE 1195-1995.



Gambar 2.7 Standar batas operasi tegangan kestabilan transien

Standar tegangan nominal dalam kondisi normal yang diperbolehkan oleh PLN yaitu:

- 500 kV + 5%, -5%
- 150 kV + 5%, -10%
- 70 kV + 5%, -10%
- 20 kV + 5%, -10%

2.4.3 Standar Pelepasan Beban (*Load Shedding*)

Berdasarkan standar ANSI/IEEE C37.106-1987, terdapat 2 skema pelepasan beban ketika terjadi gangguan antara lain adalah pelepasan beban 3 langkah dan pelepasan beban 6 langkah. Tabel 2.1 adalah pelepasan beban 3 langkah di frekuensi 50 Hz [6]

Tabel 2.1 Standar Pelepasan Beban 3 Langkah (50 Hz)

<i>Step</i>	<i>Frequency Trip Point (Hz)</i>	<i>Percent (%)</i>	<i>Percent of Load Shedding (%)</i>	<i>Fixed Time Delay (cycles) on Relay</i>
1	49,02	98,84	10	6
2	49,08	98,16	15	6
3	48,75	97,5	<i>As required to arrest decline before 48,5 Hz</i>	

Sedangkan pada Tabel 2.2 adalah pelepasan beban 6 langkah di frekuensi 50 Hz [6]

Tabel 2.1 Standar Pelepasan Beban 6 Langkah (50 Hz)

<i>Step</i>	<i>Frequency Trip Point (Hz)</i>	<i>Percent (%)</i>	<i>Percent of Load Shedding (%)</i>	<i>Fixed Time Delay (cycles) on Relay</i>
1	49,58	99,16%	10	6
2	49,33	98,66%	10	6
3	49	98%	5	6
4	49	98%	5	14
5	48,67	97,34%	5	14
6	48,67	97,34%	5	21

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB III

SISTEM KELISTRIKAN PT PERTAMINA RU IV CILACAP

3.1 Sistem Kelistrikan PT. Pertamina RU IV Cilacap

PT. Pertamina *Refinery Unit I* (Unit Pengolahan) IV Cilacap memiliki sebuah sistem yang cukup besar dengan sistem kelistrikan yang juga cukup kompleks. Sebelumnya PT Pertamina RU IV Cilacap memiliki 8 unit pembangkit yang diantaranya terdiri 4 unit berkapasitas 20 MW dan 4 unit pembangkit berkapasitas 8 MW. Total *Substation* di PT. Pertamina RU IV Cilacap berjumlah 32 *substation*. dimana masing masing *substation* memiliki beban statis dan motor. Sedangkan untuk sistem kelistrikan di PT. Pertamina RU IV Cilacap dibagi menjadi 3 *utility* yaitu *utility* I, II dan Ila.

Adanya penambahan beban pada sistem kelistrikan di PT Pertamina RU IV Cilacap mengakibatkan penambahan pembangkit dan pabrik baru. Akibatnya sistem kelistrikan di PT Pertamina RU IV Cilacap berubah karena perlu menambahkan sistem bus 33 kV. Selain itu 3 daerah *utility* berkembang menjadi 4 daerah *utility* yaitu tambahan *utility* III. Setiap *utility* memiliki beberapa pembangkit yang terhubung dengan bus-bus distribusi yang terbagi dalam beberapa *feeder*. Selanjutnya *feeder* ini akan terhubung sengan *substation* dalam suatu jaringan radial

3.2 Jumlah Total Pembangkitan, Pembebanan dan Demand

PT Pertamina RU IV Cilacap memiliki sebuah sistem yang cukup besar dan juga kompleks. *Summary* dari jumlah total pembangkitan, pembebanan, dan *demand* dapat dilihat pada Tabel 3.1 berikut :

Tabel 3.1 Jumlah Total Pembangkitan, Pembebanan
Dan Demand.

	MW	Mvar	MVA	% PF
<i>Source (swing bus)</i>	11,931	2,575	12,778	93,37 Lag
<i>Source (non swing bus)</i>	78,9	46,186	91,424	86,30 Lag
<i>Total Demand</i>	90,831	50,761	104,053	87,29 Lag
<i>Total Motor Load</i>	78,051	39,232	87,356	89,35 Lag
<i>Total Static Load</i>	12,438	8,616	15,131	82,20 Lag
<i>Total Constant Load</i>	0	0	0	

Lanjutan Tabel 3.1

	MW	Mvar	MVA	% PF
<i>Total Generic Load</i>	0	0	0	
<i>Apparent Losses</i>	0,342	2,912		

3.3 Kapasitas Pembangkitan

Untuk menanggung beban yang besar, PT Pertamina RU IV Cilacap memiliki 12 unit pembangkit yang terdiri atas 5 unit pembangkit dengan kapasitas 8 MW, 4 unit pembangkit dengan kapasitas 20 MW, dan 3 unit pembangkit dengan kapasitas 15 MW.

Berikut adalah tabel data kapasitas pembangkit di PT Pertamina RU IV Cilacap :

Tabel 3.2 Data Kapasitas Pembangkit di PT Pertamina RU IV Cilacap

No	ID	MW	MVA	KV	PF
1	51G1	8	10	13,8	80 %
2	51G2	8	10	13,8	80 %
3	51G3	8	10	13,8	80 %
4	510G2	8	10	13,8	80 %
5	510G301	8	10	13,8	80 %
6	510G201	20	25	13,8	80 %
7	051G101	20	25	13,8	80 %
8	051G102	20	25	13,8	80 %
9	051G103	20	25	13,8	80 %
10	152G501A	15	18,75	13,8	80 %
11	152G501B	15	18,75	13,8	80 %
12	152G501C	15	18,75	13,8	80 %

Dari 4 unit generator dengan kapasitas 20 MW, 2 unit dioperasikan sebagai swing generator yaitu generator 05EE0101 dan 05EE0101B. sedangkan 2 generator difungsikan sebagai Mvar/PF control yaitu generator 152-G-501A dan generator 152-G-501C. Sisanya dioperasikan sebagai *voltage control*. Swing generator terletak pada bus *utility* II. Berikut merupakan data penempatan generator di tiap daerah *utility* PT Pertamina RU IV Cilacap :

Tabel 3.3 Data Kapasitas Pembangkit Tiap *Utility* di PT. Pertamina RU IV Cilacap

<i>Utility</i>	ID	Kapasitas
I	51G1	8 MW
	51G2	8 MW
	51G3	8 MW
	510G2	8 MW
II A	510G301	8 MW
	510G201	20 MW
II	051G101	20 MW
	051G102	20 MW
	051G103	20 MW
III (baru)	152G501A	15 MW
	152G501B	15 MW
	152G5011C	15 MW

3.4 Sistem Distribusi di PT. Pertamina RU IV Cilacap

Sistem jaringan distribusi di PT. Pertamina RU IV Cilacap menggunakan sistem jaringan distribusi ring. Sistem ini memiliki beberapa keuntungan dan kerugian. Keuntungannya adalah jika terjadi gangguan pada salah satu bus maka suplai daya ke beban tidak akan terputus karena daya disalurkan melalui lebih dari satu line. Sedangkan kerugiannya adalah sistem yang rumit dengan biaya yang mahal.

Pada PT. Pertamina RU IV Cilacap, tiap-tiap *feeder* terhubung ke tiap-tiap *substation* dimana setiap *substation* menghubungkan dua *feeder* yang berbeda dari tiap-tiap bus distribusi. *Feeder* satu untuk membackup jika *feeder* lain mengalami gangguan.

Untuk transformator distribusi digunakan jenis transformator *step down* dengan beberapa kapasitas yang berbeda. Umumnya transformator distribusi ini menggunakan hubungan delta wye dan beberapa menggunakan hubungan delta delta dengan menggunakan pentanahan NGR. Berikut merupakan data transformator yang digunakan di PT. Pertamina RU IV Cilacap :

Tabel 3.4 Data Transformator di PT. Pertamina RU IV Cilacap

No	ID	MVA	KV	%Z	Hubungan
1	01EE1111A	12	13,8 / 3,3	6,8	Delta/Wye
2	01EE1211B	10	13,8 / 3,3	5,36	Delta/Wye
3	05EE1111A	7,5	13,8 / 3,3	5,33	Delta/Wye
4	40EE1111A	2,5	13,8 / 3,3	5,85	Delta/Wye
5	80EE2111A	10	13,8 / 3,3	5,85	Delta/Wye
6	200EE0201B	10	13,8 / 3,45	5,29	Delta/Wye
7	T.Int 50-500	16	13,8 / 13,8	13,51	Delta/Delta
8	T.Int 500-05	16	13,8 / 13,8	13,8	Delta/Delta
9	T2	16	33 / 13,8	10	Delta/Wye
10	T32	15	13,8 / 0,4	6,5	Delta/Wye
11	T42	16	33 / 13,8	10	Delta/Wye
12	T44	20	33 / 13,8	10	Delta/Wye
13	T45	20	33 / 13,8	10	Delta/Wye

Sedangkan untuk data peralatan *generation bus* yang ada di PT Pertamina RU IV Cilacap adalah sebagai berikut :

Tabel 3.5 Data Kapasitas *Generation Bus* di PT. Pertamina RU IV Cilacap

No	ID	KV	TYPE
1	05EE0101A	13,8	Swing
2	05EE0101B	13,8	Swing
3	50EE501	13,8	Voltage Control
4	50EE502	13,8	Voltage Control
5	50EE503	13,8	Voltage Control
6	500EE0001	13,8	Voltage Control
7	152-G-501A	13,8	Mvar/PF Control
8	152-g-501C	13,8	Mvar/PF Control
9	510G2 (NEW)	13,8	Voltage Control

3.6 Motor Induksi

Dalam suatu industri tidak pernah lepas dari penggunaan beban motor salah satunya motor induksi. Di PT Pertamina RU IV Cilacap sendiri terdapat beberapa motor induksi dengan kapasitas yang cukup besar. Berikut merupakan data motor induksi di PT Pertamina RU IV Cilacap :

Tabel 3.6 data motor di PT. Pertamina RU IV Cilacap

No	Motor ID	KV	HP	KVA	RPM	Poles
1	260K101AM	3,3	2700	2612	300	20
2	84K202C	3,3	2000	1965	300	20
3	053P101CM	3,3	1250	1076	1500	4
4	011P102AM	3,3	1500	1289	1500	4
5	014K102ABCM	3,3	2500	2437	250	24
6	46P101AM.	3,3	1000	910	3000	2

3.7 Penambahan Pembangkit dan Pabrik Baru

Akibat dari penambahan beban pada sistem kelistrikan di PT. Pertamina RU IV Cilacap mengakibatkan perlunya penambahan pembangkit dan pabrik baru. Penambahan tersebut juga mengakibatkan berubahnya sistem kelistrikan dengan adanya penambahan sistem bus 33 Kv dan berkembangnya daerah *utility* menjadi 4 daerah *utility*.

Berikut merupakan data pembangkit baru yang ada di PT. Pertamina RU IV Cilacap :

Tabel 3.7 Data Pembangkit Baru di PT. Pertamina RU IV Cilacap

No	ID	MW	MVA	KV	PF
1	152G501A	15	18,75	13,8	80%
2	152G501B	15	18,75	13,8	80%
3	152G501C	15	18,75	13,8	80%
4	510G2	8	10	13,8	80%

Beban PLBC atau Proyek Langit Biru Cilacap merupakan penambahan beban baru yang dilakukan di PT Pertamina RU IV Cilacap. Hal ini berkaitan dengan adanya varian baru dari produksi PT Pertamina yaitu pertalite. Beban PLBC tersebar di semua *utility* PT Pertamina RU IV Cilacap. Data beban PLBC dapat dilihat pada data berikut :

Tabel 3.8 Data Beban PLBC di PT. Pertamina RU IV Cilacap

No	ID	KV	KVA	PF
1	PLBC-2_3650HP	13,8	2758	98,73%
2	PLBC-3_200kW2	13,8	219	91,19%
3	PLBC-2_3650HP1	13,8	2758	98,73%

LanjutanTabel 3.8

No	ID	KV	KVA	PF
4	PLBC-149HP	13,8	174	85,6%
5	PLBC-630HP	13,8	586	80,2%
6	PLBC-149HP1	13,8	174	85,6%
7	PLBC-630HP2	13,8	586	80,2%
8	PLBC-3 200kW	13,8	219	91,19%
9	PLBC-1	13,8	11690	74,92%
10	PLBC-630HP1	13,8	5000	80%

Sedangkan untuk data beban lainnya yang digunakan di PT. Pertamina RU IV Cilacap dapat dilihat pada table berikut :

Tabel 3.9 Data Beban di PT. Pertamina RU IV Cilacap

No Item	Service	Electric Power (MW)
100	RFCC Unit-Reactor Regenerator Section	749
101	RFCC Unit-Main Column Section	2402
102	Gas Concentrate Unit	1774
103	LPG Merox Unit	88
104	Propylene Recovery Unit	509
105	Prime G+	1617
106	Amine Regeneration System	428
107	Sour Water Stripper Unit	149
108	Hydrogen Puryfication Unit	424
109	Gasoline Oxidation Stability Chemical Inaction Unit	25
110	Fresh Caustic Preparation	116
63	Sea Water System	2102
151	Auxiliary Boiler	16
152	Steam and Condensate System	153
153	Cooling Water System	972
154	Water Treating Including Desalination	1012
155	Air System	55
156	Fuel Gas and Fuel Oil System	23
157	Nitrogen System	680
158	Spent Caustic System	1
159	Tankage	2005

Lanjutan Tabel 3.9

No Item	Service	Electric Power (MW)
64	Jetty Extension and Marine Loading Arm System	1
68	Jetty Extension and Marine Loading Arm System	1
148	Flare System	49
155	Fire Water System	0
166	Waste Water Treatment	363
	Miscellaneous	2478
Total		18191

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB IV

SIMULASI DAN ANALISIS KESTABILAN TRANSIEN

4.1 Pemodelan Sistem Kelistrikan PT Pertamina RU IV Cilacap

Pemodelan *Single Line Diagram* PT Pertamina RU IV Cilacap dimodelkan melalui *software* ETAP 12.6 dengan menggunakan data-data *existing* dan data peralatan yang digunakan di PT Pertamina RU IV Cilacap. Kemudian simulasi akan dilakukan berkaitan dengan analisis kestabilan sistem ketika mengalami gangguan-gangguan besar seperti generator lepas (*generator outage*), *starting motor*, dan gangguan hubung singkat (*short circuit*).

4.2 Perencanaan Studi Kasus PT Pertamina RU IV Cilacap

Pengujian sistem kelistrikan di PT Pertamina RU IV Cilacap terhadap gangguan besar bertujuan untuk mengetahui respon sistem terhadap gangguan-gangguan yang mungkin terjadi. Oleh karena itu, perlu dilakukan analisis sistem dengan cara memberikan gangguan pada sistem kelistrikan. Gangguan-gangguan yang akan dilakukan antara lain adalah gangguan generator lepas, *starting motor*, dan hubung singkat.

Studi kasus yang akan dibahas pada Tugas Akhir ini terbagi atas 3 bagian yaitu sebagai berikut :

1. Generator Lepas

Pada kasus generator lepas, pada sistem kelistrikan PT Pertamina RU IV Cilacap diasumsikan terdapat 1 generator lepas dari sistem kelistrikan ketika sistem sedang berjalan dengan berbagai macam mode operasi. Setelah itu respon transien sistem akan dipantau untuk mengetahui apakah sistem berjalan sesuai dengan standar yang telah ada. Respon sistem yang akan dipantau antara lain adalah respon frekuensi, tegangan, dan sudut rotor sesaat setelah sistem mengalami gangguan.

2. Starting Motor

Pada kasus ini dilakukan *starting motor* ketika motor berada dalam kondisi *OFF* dengan asumsi 1 motor beroperasi sesaat setelah sistem berjalan. Motor yang di-*start* adalah motor induksi yang memiliki daya paling besar pada sistem yaitu motor

260K101/102AM (2700 HP) dan 014K102 ABCM (2500 HP). Motor induksi kemudian akan dioperasikan sesaat setelah sistem berjalan yaitu 1 detik setelah sistem mulai beroperasi. Setelah itu akan dilihat respon transien sistem ketika motor *start* diantaranya yaitu respon frekuensi, tegangan, dan sudut rotor.

4.3 Simulasi Kestabilan Transien

Respon kestabilan suatu sistem dimodelkan menggunakan *software* ETAP 12.6. Gangguan-gangguan yang terjadi di lapangan juga dapat dimodelkan sehingga lebih mudah untuk dilakukan analisis kestabilan. Simulasi kestabilan transien pada PT. Pertamina RU IV Cilacap dilakukan dengan membuat studi kasus yaitu lepasnya generator dan *starting motor*. Pengamatan kestabilan sistem diperoleh melalui respon frekuensi, tegangan, dan sudut rotor generator sistem dengan membandingkan hasil respon tersebut terhadap standar ANSI/IEEE C37.106-1987 mengenai frekuensi abnormal turbin.

Sistem dikatakan kritis apabila total pembangkitan sedikit lebih atau kurang dari total *demand* namun kestabilan sistem tidak cukup dengan memperhatikan persamaan daya di sisi pembangkit dan beban saja namun juga memperhatikan frekuensi, tegangan dan sudut rotor.

4.3.1 Simulasi Kestabilan Transien Generator Lepas

Pada kasus generator lepas dari sistem kelistrikan, diasumsikan bahwa terdapat satu generator trip secara tiba-tiba setelah sistem beroperasi selama 1 detik. Generator yang lepas untuk Case A adalah GEN 51G2 (8 MW), Case B adalah GEN 152-G-501A (15 MW), dan Case C adalah GEN 051G-102 (20 MW) dengan kondisi operasi yang berbeda-beda.

4.3.1.1 TS 1

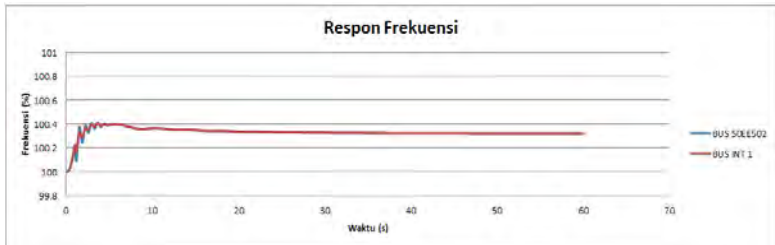
Normal Operasi Kondisi Eksisting, RFCC belum interkoneksi, 510G301, Gen PLBC dan 152-G-501B OFF, Beban PLBC dan IPAL OFF serta Generator tidak FIT

Total Pembangkitan : 89,32 MW

Total *Demand* : 67,32 MW

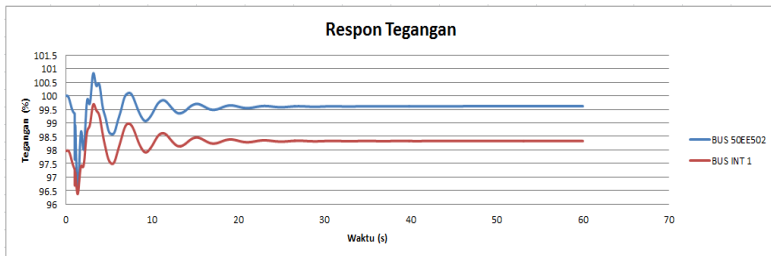
4.3.1.1.1 Generator 51G2 Trip

GEN 51G2 8 MW lepas dari sistem pada $t = 1s$, respon frekuensi, tegangan dan sudut rotor dapat dilihat sebagai berikut :



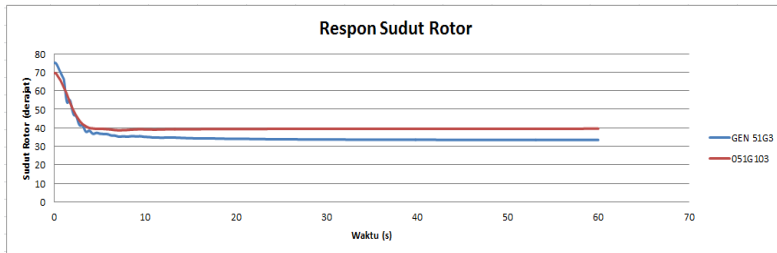
Gambar 4.1 Respon Frekuensi ketika generator 51G2 lepas dari sistem

Pada kasus GEN 8 MW lepas dari sistem pada $t = 1$ s, respon frekuensi bus terdekat dari generator yang lepas mengalami kenaikan hingga 100,4% dan *steady state* di 100,3% Berdasarkan data tersebut, respon frekuensi tersebut masih memenuhi standart ANSI/IEEE C37.106-1987 Sehingga frekuensi dikatakan beroperasi di kondisi aman.



Gambar 4.2 Respon Tegangan ketika generator 51G2 lepas dari sistem

Respon tegangan bus terdekat dari generator yang lepas mengalami penurunan dengan nilai terendah sebesar 96,4% dan *steady state* di 99,6%. Respon turunnya tegangan ini diakibatkan oleh generator sistem yang lepas sehingga beban pada sistem berupaya memperoleh arus nominal beban sedangkan jumlah beban total yang harus ditanggung sistem adalah sama. Dengan jumlah daya yang tetap dan arus yang harus disuplai menuju beban sangat besar, maka tegangan sistem akan mengalami penurunan. Pada kondisi ini berdasarkan standart tegangan PLN, dapat disimpulkan bahwa respon tegangan sistem masih berada pada kondisi aman untuk beroperasi.



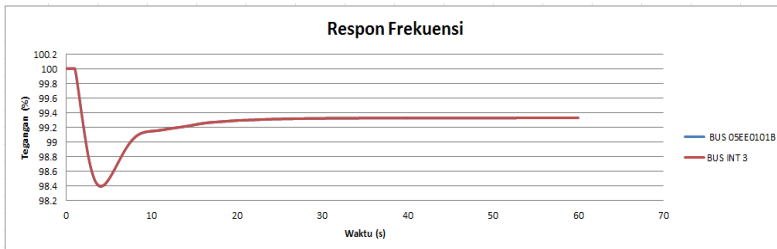
Gambar 4.3 Respon Sudut Rotor ketika generator 51G2 lepas dari sistem

Respon sudut rotor pada generator terdekat mengalami penurunan. Respon sudut rotor paling rendah 30,2°. Pada kondisi ini, respon sudut rotor generator masih dianggap aman berdasarkan standar sudut rotor.

Berdasarkan data dari respon frekuensi, tegangan, dan sudut rotor dapat disimpulkan bahwa respon frekuensi, tegangan dan sudut rotor berada pada kondisi yang aman. Sehingga sistem masih dapat beroperasi dengan respon tersebut tanpa perlu dilakukan pelepasn beban

4.3.1.1.2 Generator 051G102 Trip

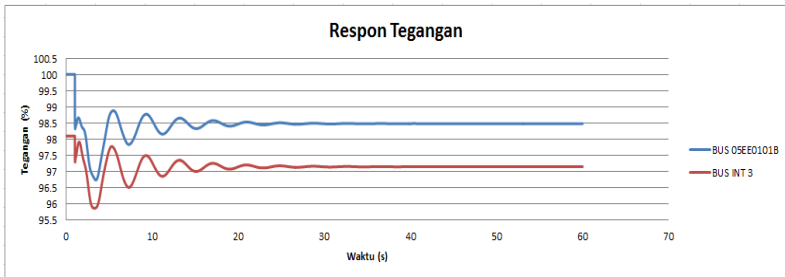
GEN 051G102 20 MW lepas dari sistem pada $t = 1s$, respon frekuensi, tegangan dan sudut rotor dapat dilihat sebagai berikut :



Gambar 4.4 Respon Frekuensi ketika generator 051G102 lepas dari sistem

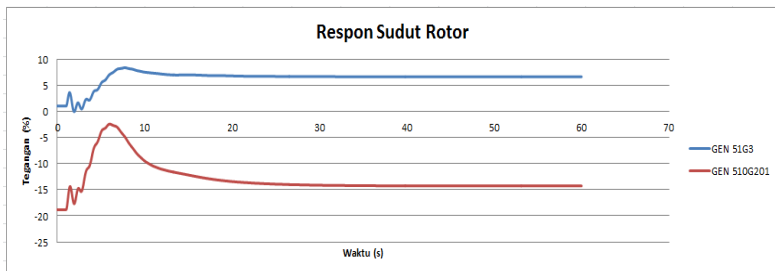
Pada kasus GEN 20 MW lepas dari sistem pada $t = 1s$, respon frekuensi bus terdekat dari generator yang lepas mengalami penurunan dengan nilai terendah sebesar 98,4%. Berdasarkan data tersebut, respon frekuensi tersebut belum memenuhi standart ANSI/IEEE C37.106-1987 yaitu frekuensi batas operasi minimal sebesar 99,84% (1 langkah)

sehingga perlu dilakukan penanganan untuk memperbaiki respon frekuensi akibat gangguan tersebut.



Gambar 4.5 Respon Tegangan ketika generator 051G102 lepas dari sistem

Respon tegangan bus terdekat dari generator yang lepas mengalami penurunan dengan nilai terendah sebesar 95,8% dan *steady state* di 97,2%. Pada kondisi ini berdasarkan standart tegangan PLN, dapat disimpulkan bahwa respon tegangan sistem masih berada pada kondisi aman untuk beroperasi.



Gambar 4.6 Respon Sudut Rotor ketika generator 051G102 lepas dari sistem

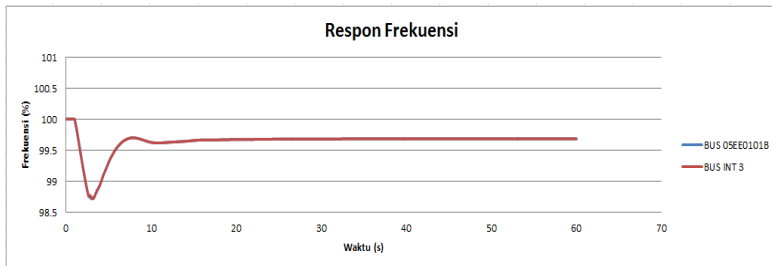
Respon sudut rotor paling rendah terjadi pada -18° dan *steady state* di $-14,8^\circ$. Pada kondisi ini, respon sudut rotor generator masih dianggap aman berdasarkan standar sudut rotor.

Berdasarkan data dari respon frekuensi, tegangan, dan sudut rotor dapat disimpulkan bahwa respon tegangan dan sudut rotor berada pada kondisi yang aman. Sehingga sistem masih dapat beroperasi dengan respon tersebut. Namun, respon frekuensi sistem jika dibandingkan

dengan batas aman frekuensi berdasarkan standar ANSI/IEEE C37.106-1987 belum memenuhi standar tersebut sehingga pada sistem harus dilakukan pelepasan beban/*load shedding* berdasarkan nilai frekuensi yang telah ditentukan dalam standar.

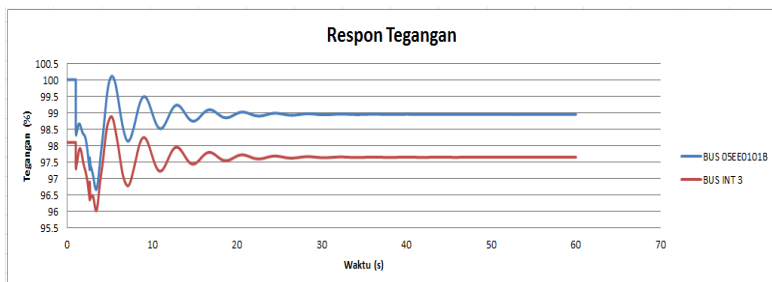
4.3.1.1.2.1 Generator 051G102 Trip + *Load Shedding I*

Pada 2,52 detik, frekuensi turun menjadi 98,83% sehingga Pelepasan beban atau *load shedding* dilakukan pada detik $2,52 + 0,12$ (waktu yang diperlukan sampai CB trip) = 2,64 detik. Total beban saat operasi ini adalah 67,32 MW. Untuk *load shedding I* jumlah beban yang harus dilepas adalah 10% dari beban total yaitu 6,7 MW.



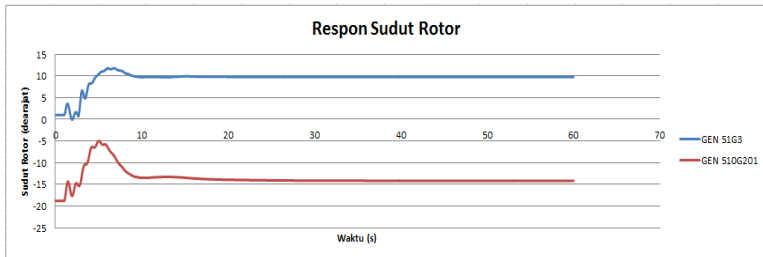
Gambar 4.7 Respon Frekuensi ketika generator 051G102 lepas dari sistem dan *load shedding I*

Hasil yang diperoleh setelah dilakukan *load shedding I*, respon frekuensi terendah menjadi 98,7% dan *steady state* di 99,7%. Berdasarkan ANSI/IEEE C37.106-1987 frekuensi sistem sudah dalam kondisi aman untuk beroperasi.



Gambar 4.8 Respon Tegangan ketika generator 051G102 lepas dari sistem dan *load shedding I*

Respon tegangan terendah menjadi 96,6 dan tertinggi di 101%. dari data tersebut dapat dikatakan respon tegangan sistem masih sesuai standard dan masih bisa beroperasi dengan aman.

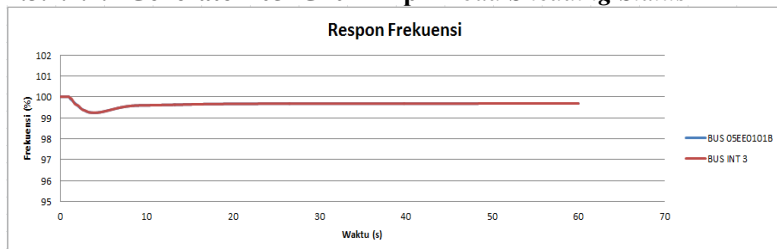


Gambar 4.9 Respon Sudut Rotor ketika generator 051G102 lepas dari sistem dan *load shedding I*

Respon sudut rotor paling rendah terjadi pada -20° dan *steady state* di -15° . Pada kondisi ini, respon sudut rotor generator masih dianggap aman berdasarkan standar sudut rotor.

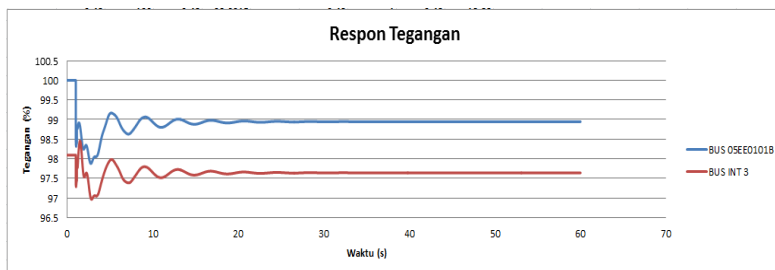
Berdasarkan respon frekuensi, tegangan, dan sudut rotor pada data di atas, dapat disimpulkan bahwa frekuensi kembali stabil dan berada pada kondisi yang aman dengan adanya pelepasan beban 1 langkah. Pelepasan beban tersebut juga berdampak pada kenaikan tegangan yang semakin baik dan aman berdasarkan standar tegangan yang telah dijelaskan sebelumnya. Kondisi sudut rotor yang mengalami osilasi juga masih berada pada kategori aman sehingga sistem dapat berjalan dengan baik ketika pelepasan beban pertama sebesar 10% atau sekitar 6,7 MW.

4.3.1.1.2.2 Generator 051G102 Trip + Load Shedding Status



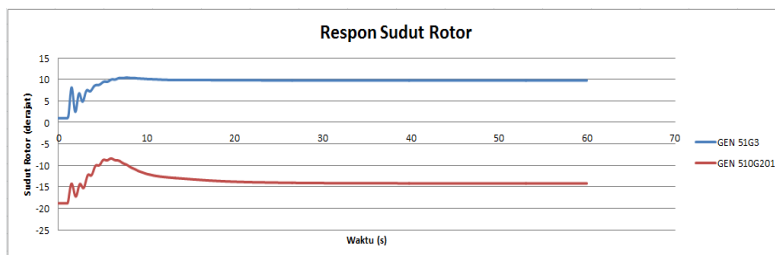
Gambar 4.10 Respon Frekuensi ketika generator 051G102 lepas dari sistem dan *load shedding status*

Hasil yang diperoleh setelah dilakukan *load shedding status*, respon frekuensi terendah menjadi 99,2% dan *steady state* di 99,6%. Berdasarkan ANSI/IEEE C37.106-1987 frekuensi sistem sudah dalam kondisi aman untuk beroperasi.



Gambar 4.11 Respon Tegangan ketika generator 051G102 lepas dari sistem dan *load shedding status*

Respon tegangan terendah menjadi 96,9% dan *steady state* di 97,6%. dari data tersebut dapat dikatakan respon tegangan sistem sudah sesuai standard dan masih bisa beroperasi dengan aman.



Gambar 4.12 Respon Sudut Rotor ketika generator 051G102 lepas dari sistem dan *load shedding status*

Respon sudut rotor paling rendah terjadi pada -18,2° dan *steady state* di -14,1°. Pada kondisi ini, respon sudut rotor generator masih dianggap aman berdasarkan standar sudut rotor.

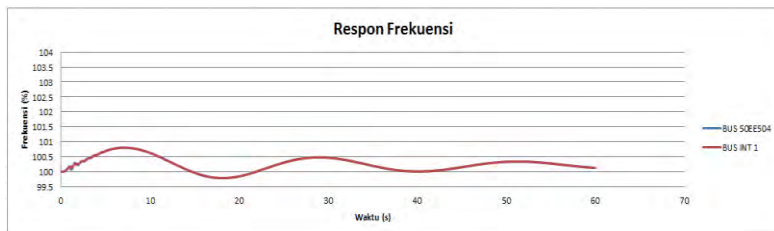
Berdasarkan respon frekuensi, tegangan, dan sudut rotor pada data di atas, dapat disimpulkan bahwa frekuensi kembali stabil dan berada pada kondisi yang aman dengan adanya pelepasan beban menggunakan status.

4.3.1.2 TS 2

TS 2 : Normal Operasi Kondisi Interkoneksi, Beban PLBC dan IPAL ON, 510G301 dan 152-G-501B OFF, serta Generator tidak FIT
Total Pembangkitan : 104 MW
Total Demand : 104 MW

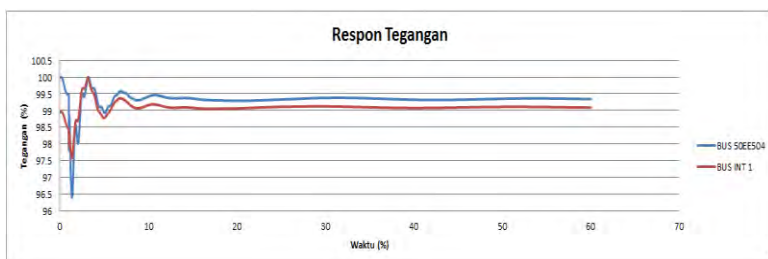
4.3.1.2.1 Generator 51G2 Trip

GEN 51G2 8 MW lepas dari sistem pada $t = 1$ s, respon frekuensi, tegangan dan sudut rotor dapat dilihat sebagai berikut :



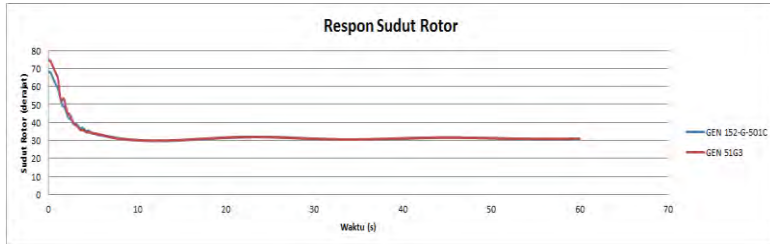
Gambar 4.13 Respon Frekuensi ketika generator 51G2 lepas dari sistem

Pada kasus GEN 8 MW lepas dari sistem pada $t = 1$ s, respon frekuensi bus terdekat dari generator yang lepas mengalami penurunan dengan nilai terendah sebesar 99,7% dan tertinggi sebesar 100,1%. Berdasarkan data tersebut, respon frekuensi tersebut masih memenuhi standart ANSI/IEEE C37.106-1987 yaitu frekuensi batas operasi minimal sebesar 99,84% (1 langkah). Sehingga frekuensi dikatakan beroperasi di kondisi aman.



Gambar 4.14 Respon Tegangan ketika generator 51G2 lepas dari sistem

Respon tegangan bus terdekat dari generator yang lepas mengalami penurunan dengan nilai terendah sebesar 96,3% dan *steady state* di 99,3%. Pada kondisi ini berdasarkan standart tegangan PLN, dapat disimpulkan bahwa respon tegangan sistem masih berada pada kondisi aman untuk beroperasi.



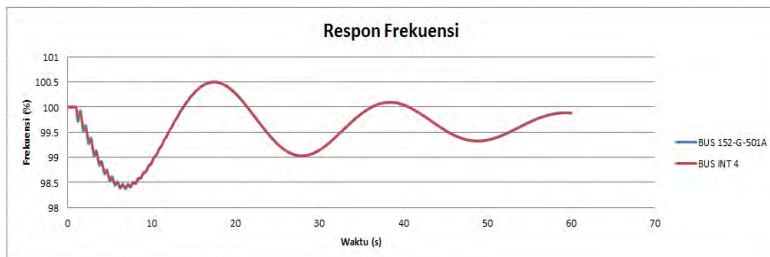
Gambar 4.15 Respon Sudut Rotor ketika generator 51G2 lepas dari sistem

Respon sudut rotor pada generator terdekat mengalami penurunan. Respon sudut rotor paling rendah terjadi pada 29,7°. Sedangkan respon sudut rotor tertinggi terjadi pada 30,8°. Pada kondisi ini, respon sudut rotor generator masih dianggap aman berdasarkan standar sudut rotor.

Berdasarkan data dari respon frekuensi, tegangan, dan sudut rotor dapat disimpulkan bahwa respon frekuensi, tegangan dan sudut rotor berada pada kondisi yang aman. Sehingga sistem masih dapat beroperasi dengan respon tersebut tanpa perlu dilakukan pelepasn beban

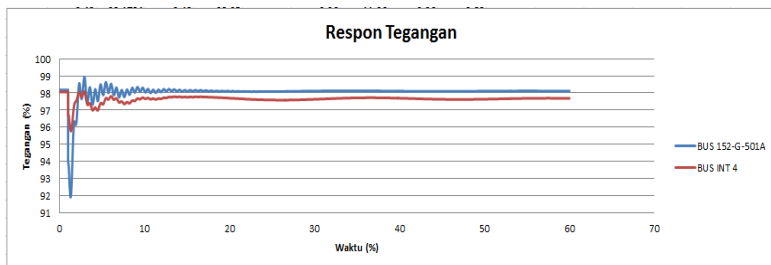
4.3.1.2.2 Generator 152-G-501A Trip

GEN 152-G-501A 15 MW lepas dari sistem pada $t = 1s$, respon frekuensi, tegangan dan sudut rotor dapat dilihat sebagai berikut :



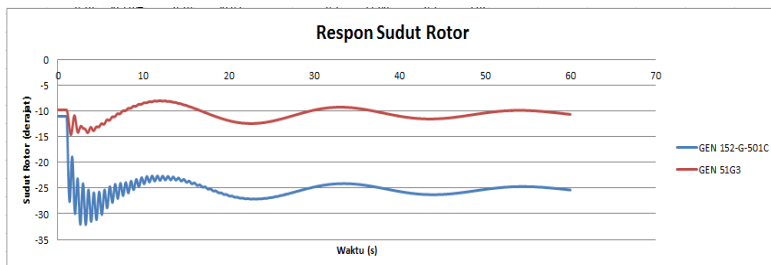
Gambar 4.16 Respon Frekuensi ketika generator 152-G-501A lepas dari sistem

Pada kasus GEN 15 MW lepas dari sistem pada $t = 1$ s, respon frekuensi bus terdekat dari generator yang lepas mengalami penurunan dengan nilai terendah sebesar 98,3% dan tertinggi sebesar 100,4%. Berdasarkan data tersebut, respon frekuensi tersebut belum memenuhi standart ANSI/IEEE C37.106-1987 yaitu frekuensi batas operasi minimal sebesar 99,84% (1 langkah) sehingga perlu dilakukan penanganan untuk memperbaiki respon frekuensi akibat gangguan tersebut.



Gambar 4.17 Respon Tegangan ketika generator 152-G-501A lepas dari sistem

Pada kasus GEN 15 MW lepas dari sistem pada $t = 1$ s, respon tegangan bus terdekat dari generator yang lepas mengalami penurunan dengan nilai terendah sebesar 91,9% untuk sesaat dan *steady state* di 98,1%. Pada kondisi ini berdasarkan standart tegangan PLN, dapat disimpulkan bahwa respon tegangan sistem masih berada pada kondisi aman untuk beroperasi.



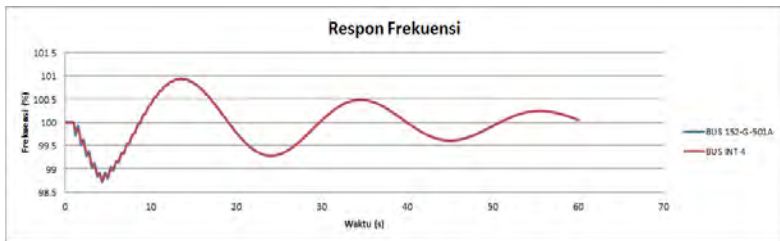
Gambar 4.18 Respon Sudut Rotor ketika generator 152-G-501A lepas dari sistem

Pada kasus GEN 15 MW lepas dari sistem pada $t = 1s$, respon sudut rotor pada generator terdekat terus berosilasi untuk mempertahankan kestabilan sistem. Respon sudut rotor paling rendah terjadi pada $-31,8^\circ$. Sedangkan respon sudut rotor tertinggi terjadi pada -11° . Pada kondisi ini, respon sudut rotor generator masih dianggap aman berdasarkan standar sudut rotor.

Berdasarkan data dari respon frekuensi, tegangan, dan sudut rotor dapat disimpulkan bahwa respon tegangan dan sudut rotor berada pada kondisi yang aman. Sehingga sistem masih dapat beroperasi dengan respon tersebut. Namun, respon frekuensi sistem jika dibandingkan dengan batas aman frekuensi berdasarkan standar ANSI/IEEE C37.106-1987 belum memenuhi standar tersebut sehingga pada sistem harus dilakukan pelepasan beban/*load shedding* berdasarkan nilai frekuensi yang telah ditentukan dalam standar.

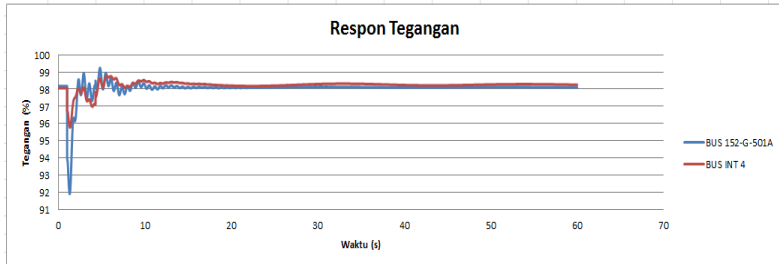
4.3.1.2.2.1 Generator 152-G-501A Trip + Load Shedding I

Pada 4,16 detik, frekuensi turun menjadi 98,83% sehingga Pelepasan beban atau *load shedding* dilakukan pada detik 4,16 + 0,12 (waktu yang diperlukan sampai CB trip) = 4,28 detik. Total beban saat operasi ini adalah 104,205 MW. Untuk *load shedding I* jumlah beban yang harus dilepas adalah 10% dari beban total yaitu 10,4 MW.



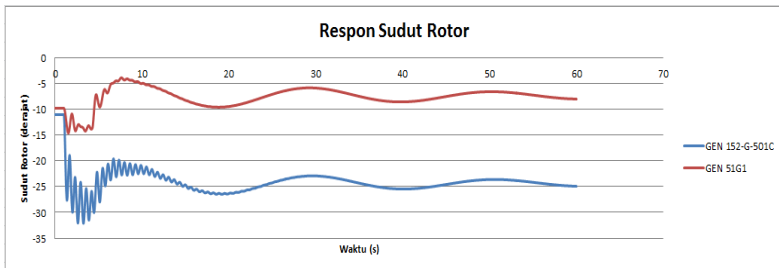
Gambar 4.19 Respon Frekuensi ketika generator 152-G-501A lepas dari sistem dan *load shedding I*

Hasil yang diperoleh setelah dilakukan *load shedding I*, respon frekuensi terendah menjadi 98,7% dan tertinggi di 100,9%. Berdasarkan ANSI/IEEE C37.106-1987 frekuensi sistem sudah dalam kondisi aman untuk beroperasi.



Gambar 4.20 Respon Tegangan ketika generator 152-G-501A lepas dari sistem dan *load shedding I*

Respon tegangan terendah sesaat menjadi 91,9% dan *steady state* di 98,2% di. dari data tersebut dapat dikatakan respon tegangan sistem masih sesuai standard dan masih bisa beroperasi dengan aman.



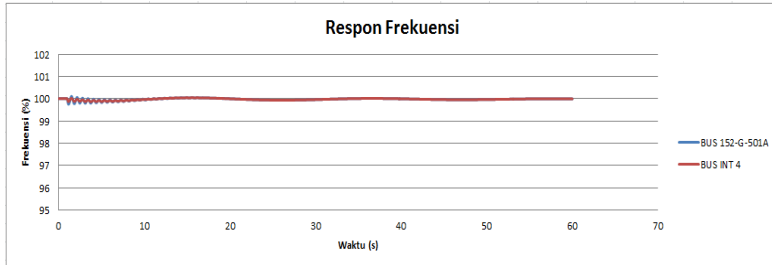
Gambar 4.21 Respon Sudut Rotor ketika generator 152-G-501A lepas dari sistem dan *load shedding I*

Respon sudut rotor paling rendah terjadi pada $-32,1^\circ$. Sedangkan respon sudut rotor tertinggi terjadi pada -11° . Pada kondisi ini, respon sudut rotor generator masih dianggap aman berdasarkan standar sudut rotor.

Berdasarkan respon frekuensi, tegangan, dan sudut rotor pada data di atas, dapat disimpulkan bahwa frekuensi kembali stabil dan berada pada kondisi yang aman dengan adanya pelepasan beban 1 langkah. Pelepasan beban tersebut juga berdampak pada kenaikan tegangan yang semakin baik dan aman berdasarkan standar tegangan yang telah dijelaskan sebelumnya. Kondisi sudut rotor yang mengalami osilasi juga

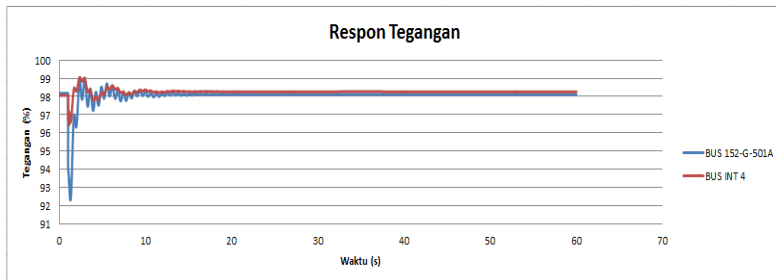
masih berada pada kategori aman sehingga sistem dapat berjalan dengan baik ketika pelepasan beban pertama sebesar 10% atau sekitar 10,4 MW.

4.3.1.2.2.2 Generator 152-G-501A Trip + Load Shedding Status



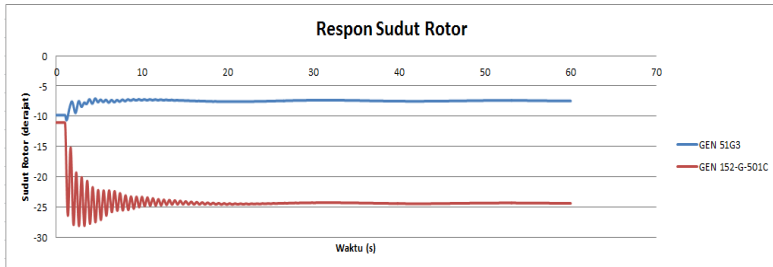
Gambar 4.22 Respon Frekuensi ketika generator 152-G-501A lepas dari sistem dan *load shedding status*

Hasil yang diperoleh setelah dilakukan *load shedding status*, respon frekuensi terendah menjadi 99,7% dan *steady state* di 99,9%. Berdasarkan ANSI/IEEE C37.106-1987 frekuensi sistem sudah dalam kondisi aman untuk beroperasi.



Gambar 4.23 Respon Tegangan ketika generator 152-G-501A lepas dari sistem dan *load shedding status*

Respon tegangan terendah sesaat menjadi 92,3% dan *steady state* di 98,1%, dari data tersebut dapat dikatakan respon tegangan sistem sudah sesuai standard dan masih bisa beroperasi dengan aman.



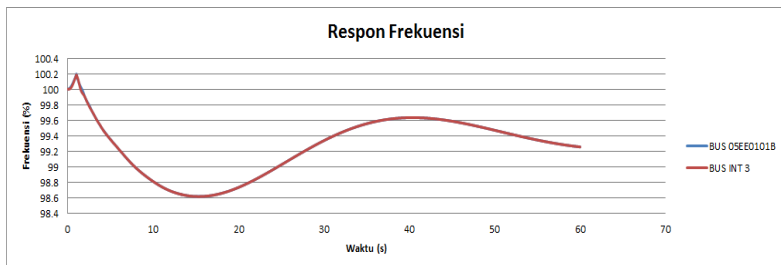
Gambar 4.24 Respon Sudut Rotor ketika generator 152-G-501A lepas dari sistem dan *load shedding status*

Respon sudut rotor paling rendah terjadi pada $-28,1^\circ$ dan *steady state* di $-24,4^\circ$. Pada kondisi ini, respon sudut rotor generator masih dianggap aman berdasarkan standar sudut rotor.

Berdasarkan respon frekuensi, tegangan, dan sudut rotor pada data di atas, dapat disimpulkan bahwa frekuensi kembali stabil dan berada pada kondisi yang aman dengan adanya pelepasan beban menggunakan status.

4.3.1.2.3 Generator 051G102 Trip

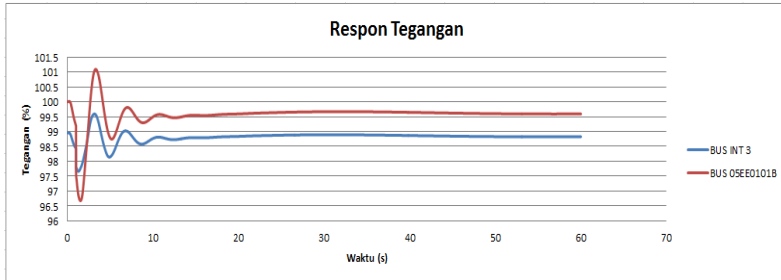
GEN 051G102 20 MW lepas dari sistem pada $t = 1s$, respon frekuensi, tegangan dan sudut rotor dapat dilihat sebagai berikut :



Gambar 4.25 Respon Frekuensi ketika generator 051G102 lepas dari sistem

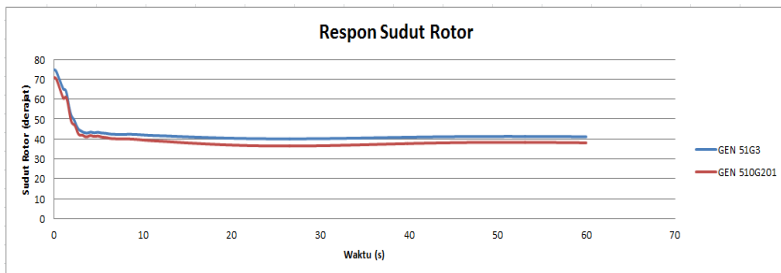
Pada kasus GEN 20 MW lepas dari sistem pada $t = 1s$, respon frekuensi bus terdekat dari generator yang lepas mengalami penurunan dengan nilai terendah sebesar 98,6% dan tertinggi sebesar 100,1%. Berdasarkan data tersebut, respon frekuensi tersebut belum memenuhi

standart ANSI/IEEE C37.106-1987 yaitu frekuensi batas operasi minimal sebesar 99,84% (1 langkah) sehingga perlu dilakukan penanganan untuk memperbaiki respon frekuensi akibat gangguan tersebut.



Gambar 4.26 Respon Tegangan ketika generator 051G102 lepas dari sistem

Pada kasus GEN 20 MW lepas dari sistem pada $t = 1s$, respon tegangan bus terdekat dari generator yang lepas mengalami penurunan dengan nilai terendah sebesar 96,6% dan tertinggi sebesar 101,09%. Pada kondisi ini berdasarkan standart tegangan PLN, dapat disimpulkan bahwa respon tegangan sistem masih berada pada kondisi aman untuk beroperasi.



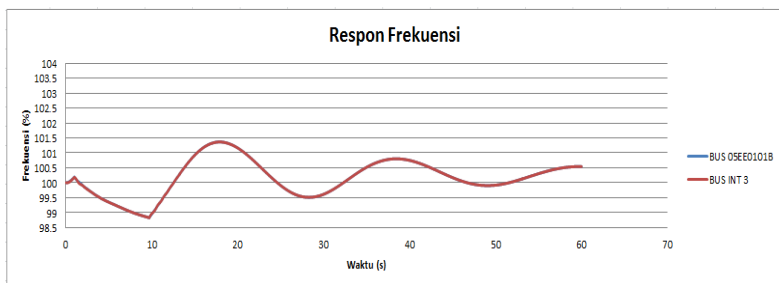
Gambar 4.27 Respon Sudut Rotor ketika generator 051G102 lepas dari sistem

Respon sudut rotor pada generator terdekat mengalami penurunan. Respon sudut rotor turun dan *steady state* di $38,7^\circ$. Pada kondisi ini, respon sudut rotor generator masih dianggap aman berdasarkan standar sudut rotor.

Berdasarkan data dari respon frekuensi, tegangan, dan sudut rotor dapat disimpulkan bahwa respon tegangan dan sudut rotor berada pada kondisi yang aman. Sehingga sistem masih dapat beroperasi dengan respon tegangan tersebut. Namun, respon sudut rotor dan frekuensi sistem jika dibandingkan dengan batas aman frekuensi berdasarkan standar ANSI/IEEE C37.106-1987 belum memenuhi standar tersebut sehingga pada sistem harus dilakukan pelepasan beban/*load shedding* berdasarkan nilai frekuensi yang telah ditentukan dalam standar.

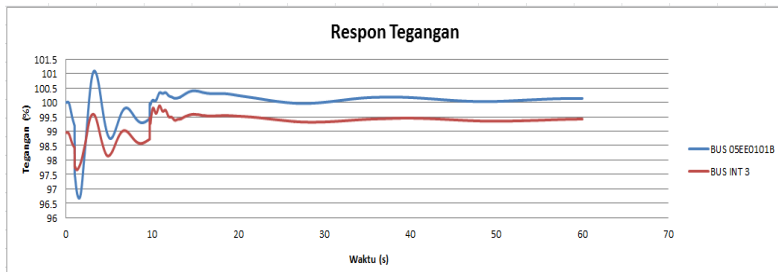
4.3.1.2.3.1 Generator 051G102 Trip + *Load Shedding I*

Pada 9,6 detik, frekuensi turun menjadi 98,83% sehingga Pelepasan beban atau *load shedding* dilakukan pada detik 9,6 + 0,12 (waktu yang diperlukan sampai CB trip) = 9,72 detik. Total beban saat operasi ini adalah 104,205 MW. Untuk *load shedding I* jumlah beban yang harus dilepas adalah 10% dari beban total yaitu 10,4 MW.



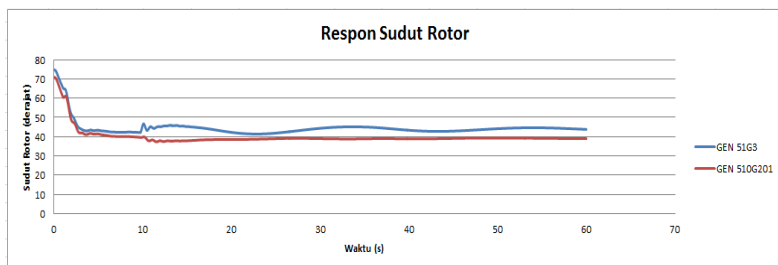
Gambar 4.28 Respon Frekuensi ketika generator 051G102 lepas dari sistem dan *load shedding I*

Hasil yang diperoleh setelah dilakukan *load shedding I*, respon frekuensi terendah menjadi 98,8% dan tertinggi di 101,3%. Setelah itu *steady state* di frekuensi 100% - 100,5%. Berdasarkan ANSI/IEEE C37.106-1987 frekuensi sistem sudah dalam kondisi aman untuk beroperasi.



Gambar 4.29 Respon Tegangan ketika generator 051G102 lepas dari sistem dan *load shedding I*

respon tegangan terendah menjadi 96,6% dan tertinggi di 101%. dari data tersebut dapat dikatakan respon tegangan sistem masih sesuai standard dan masih bisa beroperasi dengan aman.

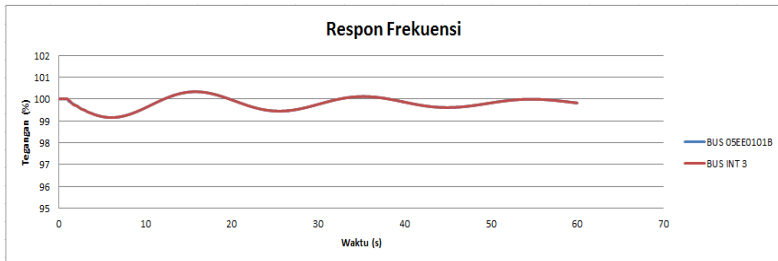


Gambar 4.30 Respon Sudut Rotor ketika generator 051G102 lepas dari sistem dan *load shedding I*

Respon sudut rotor paling rendah terjadi pada 38,95°. Pada kondisi ini, respon sudut rotor generator masih dianggap aman berdasarkan standar sudut rotor.

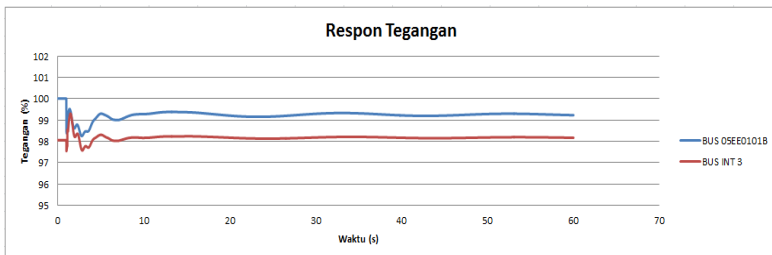
Berdasarkan respon frekuensi, tegangan, dan sudut rotor pada data di atas, dapat disimpulkan bahwa frekuensi kembali stabil dan berada pada kondisi yang aman dengan adanya pelepasan beban 1 langkah. Pelepasan beban tersebut juga berdampak pada kenaikan tegangan yang semakin baik dan aman berdasarkan standar tegangan yang telah dijelaskan sebelumnya. Kondisi sudut rotor yang mengalami osilasi juga masih berada pada kategori aman sehingga sistem dapat berjalan dengan baik ketika pelepasan beban pertama sebesar 10% atau sekitar 10,4 MW.

4.3.1.2.3.2 Generator 051G102 Trip + Load Shedding Status



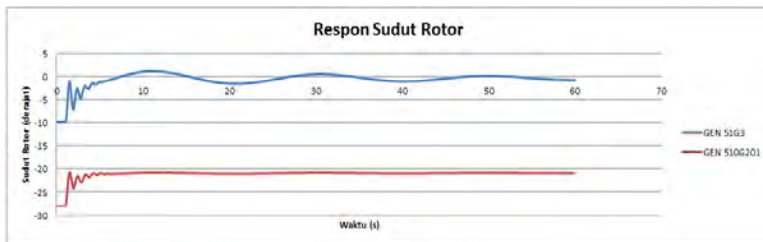
Gambar 4.31 Respon Frekuensi ketika generator 051G102 lepas dari sistem dan *load shedding status*

Hasil yang diperoleh setelah dilakukan *load shedding status*, respon frekuensi terendah menjadi 99,2% dan *steady state* di 99,8%. Berdasarkan ANSI/IEEE C37.106-1987 frekuensi sistem sudah dalam kondisi aman untuk beroperasi.



Gambar 4.32 Respon Tegangan ketika generator 051G102 lepas dari sistem dan *load shedding status*

Respon tegangan terendah menjadi 97,5% dan *steady state* di 98,1%. dari data tersebut dapat dikatakan respon tegangan sistem sudah sesuai standard dan masih bisa beroperasi dengan aman.



Gambar 4.33 Respon Sudut Rotor ketika generator 051G102 lepas dari sistem dan *load shedding status*

Respon sudut rotor paling rendah terjadi pada $-28,1^\circ$ dan *steady state* di $-20,9^\circ$. Pada kondisi ini, respon sudut rotor generator masih dianggap aman berdasarkan standar sudut rotor.

Berdasarkan respon frekuensi, tegangan, dan sudut rotor pada data di atas, dapat disimpulkan bahwa frekuensi kembali stabil dan berada pada kondisi yang aman dengan adanya pelepasan beban menggunakan status.

4.3.1.3 TS III

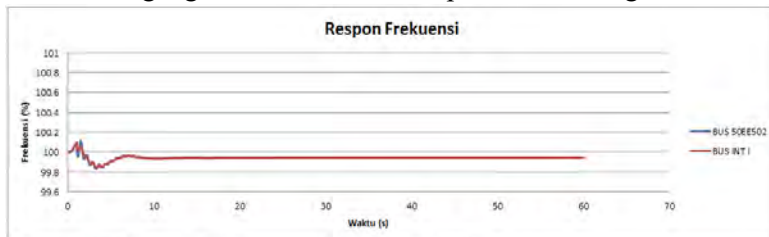
TS Case-3 : Normal Operasi Kondisi Interkoneksi, Beban PLBC dan IPAL ON, 51G1, 510G301 dan 152-G-501B OFF, serta Generator tidak FIT

Total Pembangkitan : 104 MW

Total *Demand* : 103,8 MW

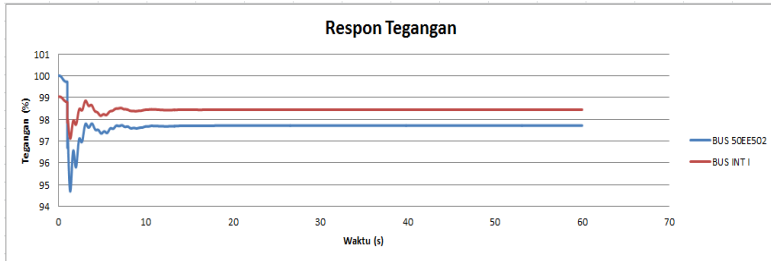
4.3.1.3.1 Generator 51G2 Trip

GEN 51G2 20 MW lepas dari sistem pada $t = 1s$, respon frekuensi, tegangan dan sudut rotor dapat dilihat sebagai berikut :



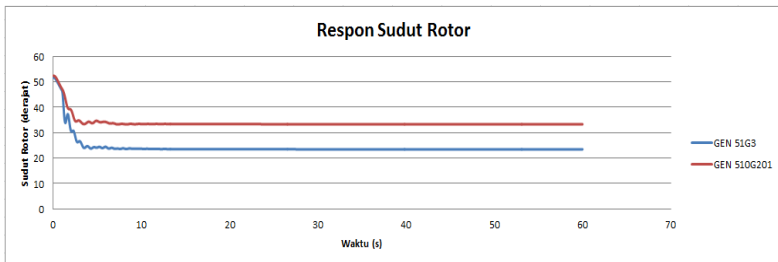
Gambar 4.34 Respon Frekuensi ketika generator 51G2 lepas dari sistem

Pada kasus GEN 8 MW lepas dari sistem pada $t = 1s$, respon frekuensi bus terdekat dari generator yang lepas mengalami penurunan hingga 99,8% dan *steady state* di 99,9% Berdasarkan data tersebut, respon frekuensi tersebut masih memenuhi standart ANSI/IEEE C37.106-1987 Sehingga frekuensi dikatakan beroperasi di kondisi aman.



Gambar 4.35 Respon Tegangan ketika generator 51G2 lepas dari sistem

Respon tegangan bus terdekat dari generator yang lepas mengalami penurunan dengan nilai terendah sebesar 94,6% dan *steady state* di 97,7%. Pada kondisi ini berdasarkan standart tegangan PLN, dapat disimpulkan bahwa respon tegangan sistem masih berada pada kondisi aman untuk beroperasi.



Gambar 4.36 Respon Sudut Rotor ketika generator 51G2 lepas dari sistem

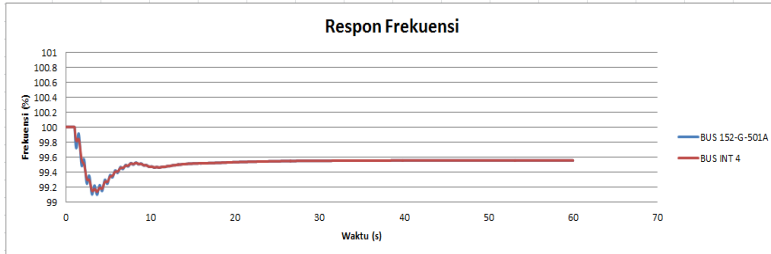
Respon sudut rotor pada generator terdekat mengalami penurunan. Respon sudut rotor paling rendah 23,45°. Pada kondisi ini, respon sudut rotor generator masih dianggap aman berdasarkan standar sudut rotor.

Berdasarkan data dari respon frekuensi, tegangan, dan sudut rotor dapat disimpulkan bahwa respon frekuensi, tegangan dan sudut rotor

berada pada kondisi yang aman. Sehingga sistem masih dapat beroperasi dengan respon tersebut tanpa perlu dilakukan pelepasan beban

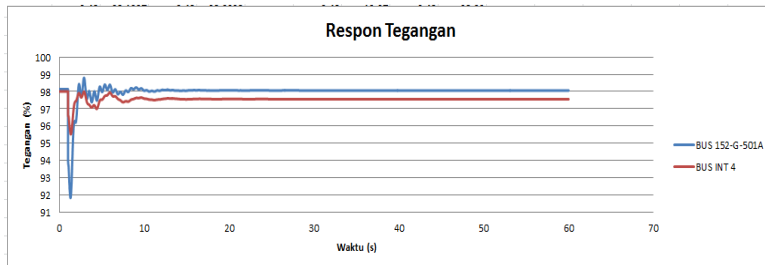
4.3.1.3.3 Generator 152G501A Trip

GEN 152G501A 15 MW lepas dari sistem pada $t = 1$ s, respon frekuensi, tegangan dan sudut rotor dapat dilihat sebagai berikut :



Gambar 4.37 Respon Frekuensi ketika generator 152G501A lepas dari sistem

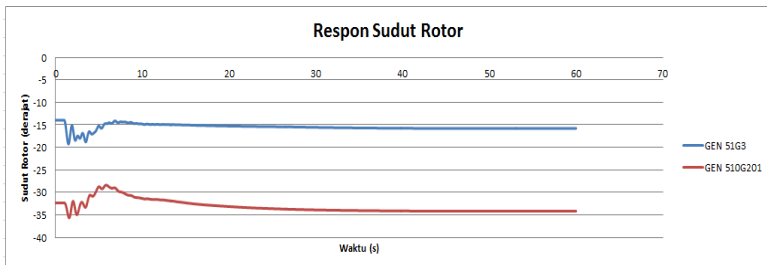
Pada kasus GEN 15 MW lepas dari sistem pada $t = 1$ s, respon frekuensi bus terdekat dari generator yang lepas mengalami penurunan hingga 99,14% dan *steady state* di 99,5% Berdasarkan data tersebut, respon frekuensi tersebut masih memenuhi standart ANSI/IEEE C37.106-1987 Sehingga frekuensi dikatakan beroperasi di kondisi aman.



Gambar 4.38 Respon Tegangan ketika generator 152G501A lepas dari sistem

Respon tegangan bus terdekat dari generator yang lepas mengalami penurunan dengan nilai terendah sesaat sebesar 91,8% dan *steady state* di 98%. Pada kondisi ini berdasarkan standart tegangan

PLN, dapat disimpulkan bahwa respon tegangan sistem masih berada pada kondisi aman untuk beroperasi.



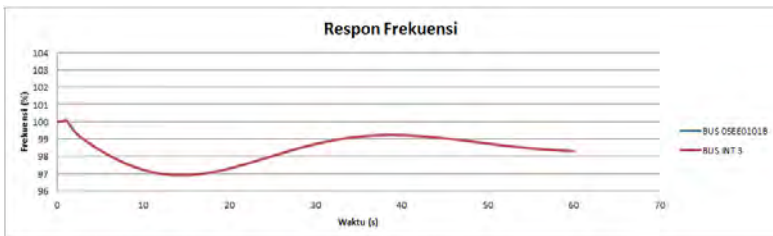
Gambar 4.39 Respon Sudut Rotor ketika generator 152G501A lepas dari sistem

Respon sudut rotor pada generator terdekat mengalami penurunan. Respon sudut rotor paling rendah $-35,6^\circ$ dan *steady state* di $-34,17^\circ$. Pada kondisi ini, respon sudut rotor generator masih dianggap aman berdasarkan standar sudut rotor.

Berdasarkan data dari respon frekuensi, tegangan, dan sudut rotor dapat disimpulkan bahwa respon frekuensi, tegangan dan sudut rotor berada pada kondisi yang aman. Sehingga sistem masih dapat beroperasi dengan respon tersebut tanpa perlu dilakukan pelepasn beban

4.3.1.3.3 Generator 051G102 Trip

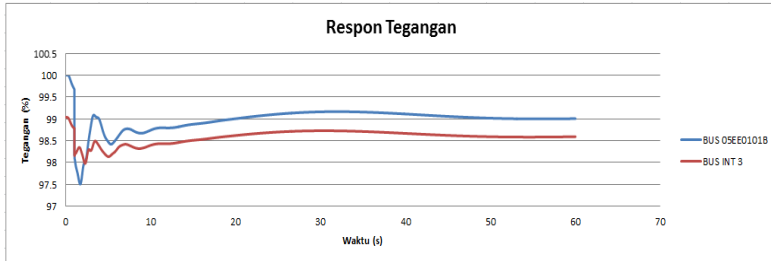
GEN 051G102 20 MW lepas dari sistem pada $t = 1s$, respon frekuensi, tegangan dan sudut rotor dapat dilihat sebagai berikut :



Gambar 4.40 Respon Frekuensi ketika generator 051G102 lepas dari sistem

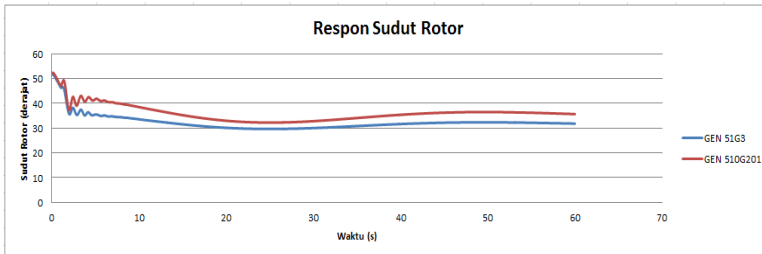
Pada kasus GEN 20 MW lepas dari sistem pada $t = 1s$, respon frekuensi bus terdekat dari generator yang lepas mengalami penurunan

dengan nilai terendah sebesar 96,8%. Berdasarkan data tersebut, respon frekuensi tersebut belum memenuhi standart ANSI/IEEE C37.106-1987 yaitu frekuensi batas operasi minimal sebesar 99,84% (1 langkah) sehingga perlu dilakukan penanganan untuk memperbaiki respon frekuensi akibat gangguan tersebut.



Gambar 4.41 Respon Tegangan ketika generator 051G102 lepas dari sistem

Respon tegangan bus terdekat dari generator yang lepas mengalami penurunan dengan nilai terendah sesaat sebesar 97,5% dan *steady state* di 99%. Pada kondisi ini berdasarkan standart tegangan PLN, dapat disimpulkan bahwa respon tegangan sistem masih berada pada kondisi aman untuk beroperasi.



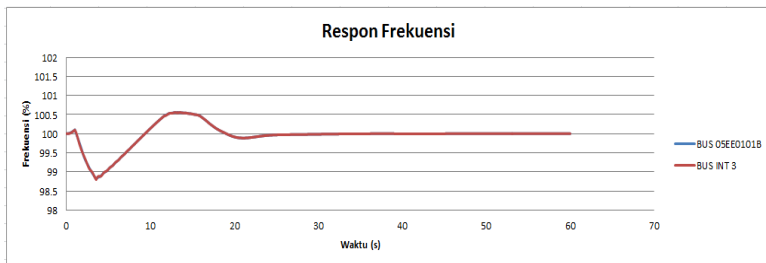
Gambar 4.42 Respon Tegangan ketika generator 051G102 lepas dari sistem

Respon sudut rotor pada generator terdekat mengalami penurunan. Respon sudut rotor paling rendah 29,6° dan *steady state* di 31,8°. Pada kondisi ini, respon sudut rotor generator masih dianggap aman berdasarkan standar sudut rotor.

Berdasarkan data dari respon frekuensi, tegangan, dan sudut rotor dapat disimpulkan bahwa respon tegangan dan sudut rotor berada pada kondisi yang aman. Namun respon frekuensi masih dibawah standar yang diperbolehkan sehingga perlu dilakukan pelepasan beban.

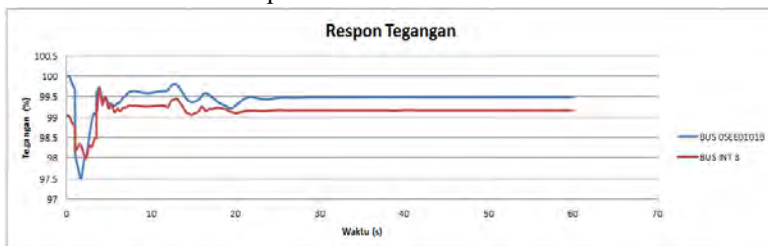
4.3.1.3.3.1 Generator 051G102 Trip + Load Shedding I

Pada 3,42 detik, frekuensi turun menjadi 98,83% sehingga Pelepasan beban atau *load shedding* dilakukan pada detik $3,42 + 0,12$ (waktu yang diperlukan sampai CB trip) = 3,54 detik. Total beban saat operasi ini adalah 103,818 MW. Untuk *load shedding I* jumlah beban yang harus dilepas adalah 10% dari beban total yaitu 10,3 MW.



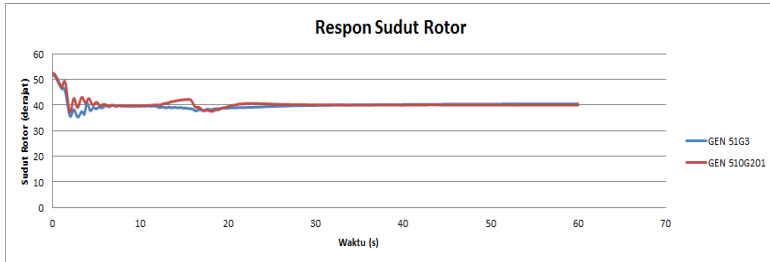
Gambar 4.43 Respon Frekuensi ketika generator 051G102 lepas dari sistem dan *load shedding I*

Hasil yang diperoleh setelah dilakukan *load shedding I*, respon frekuensi terendah menjadi 98,7% dan *steady state* di 99,9%. Berdasarkan ANSI/IEEE C37.106-1987 frekuensi sistem sudah dalam kondisi aman untuk beroperasi.



Gambar 4.44 Respon Tegangan ketika generator 051G102 lepas dari sistem dan *load shedding I*

respon tegangan terendah menjadi 97,5% dan *steady state* di 99,4%. dari data tersebut dapat dikatakan respon tegangan sistem masih sesuai standard dan masih bisa beroperasi dengan aman.

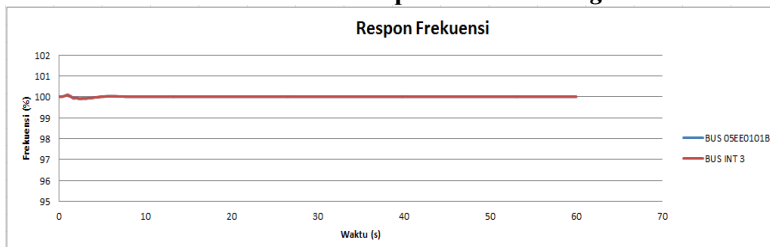


Gambar 4.45 Respon Sudut Rotor ketika generator 051G102 lepas dari sistem dan *load shedding I*

Respon sudut rotor paling rendah terjadi pada $36,2^\circ$ dan *steady state* di $40,44^\circ$. Pada kondisi ini, respon sudut rotor generator masih dianggap aman berdasarkan standar sudut rotor.

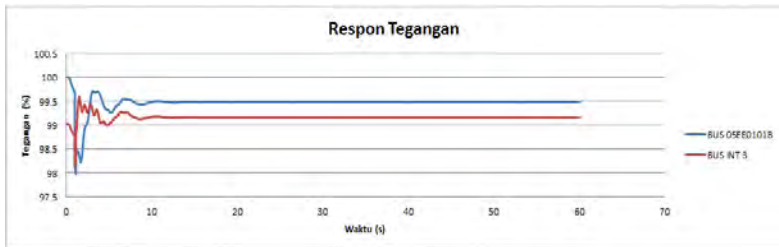
Berdasarkan respon frekuensi, tegangan, dan sudut rotor pada data di atas, dapat disimpulkan bahwa frekuensi kembali stabil dan berada pada kondisi yang aman dengan adanya pelepasan beban 1 langkah. Pelepasan beban tersebut juga berdampak pada kenaikan tegangan yang semakin baik dan aman berdasarkan standar tegangan yang telah dijelaskan sebelumnya. Kondisi sudut rotor yang mengalami osilasi juga masih berada pada kategori aman sehingga sistem dapat berjalan dengan baik ketika pelepasan beban pertama sebesar 10% atau sekitar 10,3 MW.

4.3.1.3.3.2 Generator 051G102 Trip + *Load Shedding Status*



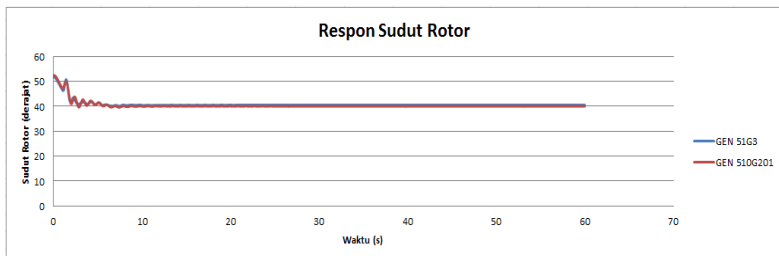
Gambar 4.46 Respon Frekuensi ketika generator 051G102 lepas dari sistem dan *load shedding status*

Hasil yang diperoleh setelah dilakukan *load shedding status*, respon frekuensi terendah menjadi 99,9% dan *steady state* di 100%. Berdasarkan ANSI/IEEE C37.106-1987 frekuensi sistem sudah dalam kondisi aman untuk beroperasi.



Gambar 4.47 Respon Tegangan ketika generator 051G102 lepas dari sistem dan *load shedding status*

Respon tegangan terendah menjadi 97,9% dan *steady state* di 99,4%. dari data tersebut dapat dikatakan respon tegangan sistem sudah sesuai standard dan masih bisa beroperasi dengan aman.



Gambar 4.48 Respon Sudut Rotor ketika generator 051G102 lepas dari sistem dan *load shedding status*

Respon sudut rotor paling tinggi terjadi pada 51,6° dan *steady state* di 40,4°. Pada kondisi ini, respon sudut rotor generator masih dianggap aman berdasarkan standar sudut rotor.

Berdasarkan respon frekuensi, tegangan, dan sudut rotor pada data di atas, dapat disimpulkan bahwa frekuensi kembali stabil dan berada pada kondisi yang aman dengan adanya pelepasan beban menggunakan status.

4.3.1.4 TS IV

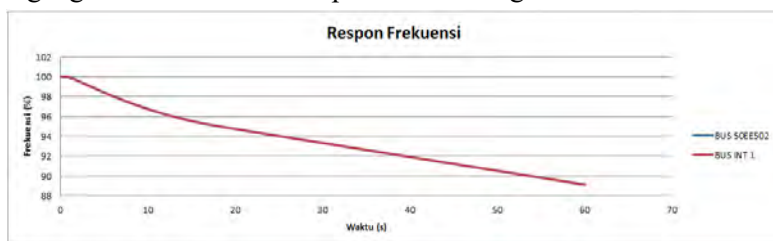
TS Case-4 : Normal Operasi Kondisi Interkoneksi, Beban PLBC dan IPAL ON, 051G101, 510G301 dan 152-G-501B OFF, serta Generator tidak FIT

Total Pembangkitan : 104 MW

Total Demand : 104 MW

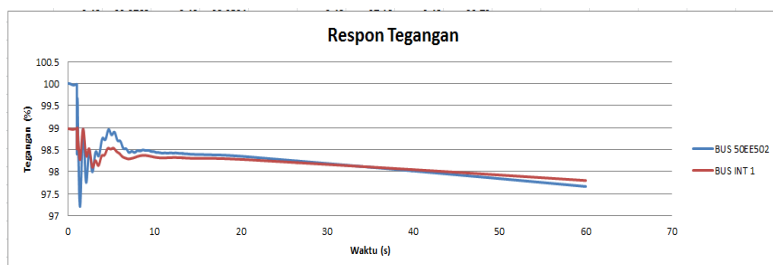
4.3.1.4.1 Generator 51G2 Trip

GEN 51G2 8 MW lepas dari sistem pada $t = 1$ s, respon frekuensi, tegangan dan sudut rotor dapat dilihat sebagai berikut :



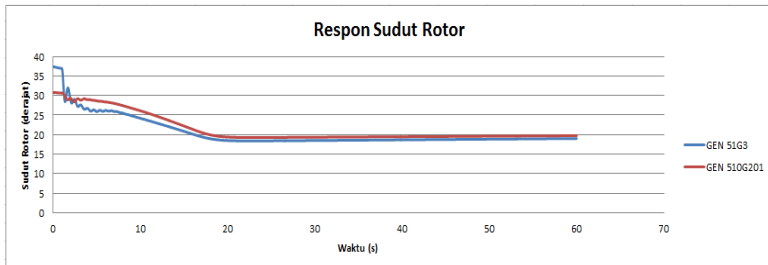
Gambar 4.49 Respon Frekuensi ketika generator 51G2 lepas dari sistem

Pada kasus GEN 8 MW lepas dari sistem pada $t = 1$ s, respon frekuensi bus terdekat dari generator yang lepas mengalami penurunan dengan nilai terendah sebesar 90% dan terus turun. Berdasarkan data tersebut, respon frekuensi tersebut belum memenuhi standart ANSI/IEEE C37.106-1987 yaitu frekuensi batas operasi minimal sebesar 99,84% (1 langkah) sehingga perlu dilakukan penanganan untuk memperbaiki respon frekuensi akibat gangguan tersebut.



Gambar 4.50 Respon Tegangan ketika generator 51G2 lepas dari sistem

Respon tegangan bus terdekat dari generator yang lepas mengalami penurunan dengan nilai terendah sesaat sebesar 97,7% dan terus turun. Pada kondisi ini berdasarkan standart tegangan PLN, dapat disimpulkan bahwa respon tegangan sistem belum berada pada kondisi aman untuk beroperasi. Sehingga perlu dilakukan penanganan untuk memperbaiki respon tegangan akibat gangguan tersebut.



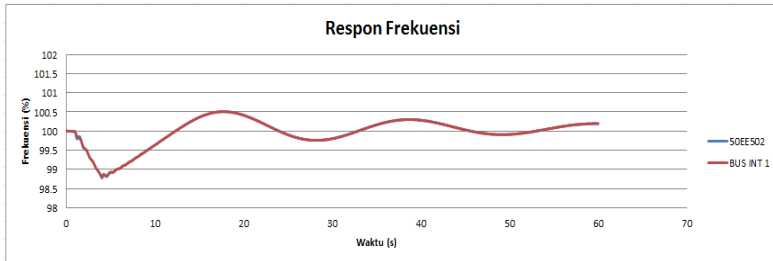
Gambar 4.51 Respon Sudut Rotor ketika generator 51G2 lepas dari sistem

Respon sudut rotor pada generator terdekat mengalami penurunan. Respon sudut turun dan *steady state* di $18,9^\circ$. Pada kondisi ini, respon sudut rotor generator masih dianggap aman berdasarkan standar sudut rotor.

Berdasarkan data dari respon frekuensi, tegangan, dan sudut rotor dapat disimpulkan bahwa respon tegangan dan sudut rotor berada pada kondisi yang aman. Namun respon frekuensi masih dibawah standar yang diperbolehkan sehingga perlu dilakukan pelepasan beban.

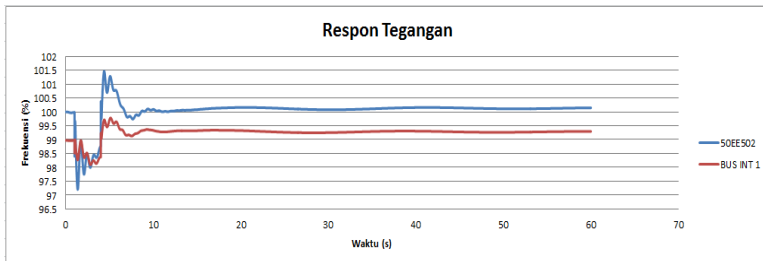
4.3.1.4.1.1 Generator 51G2 Trip + *Load Shedding I*

Pada 3,88 detik, frekuensi turun menjadi 98,83% sehingga Pelepasan beban atau *load shedding* dilakukan pada detik $3,88 + 0,12$ (waktu yang diperlukan sampai CB trip) = 4 detik. Total beban saat operasi ini adalah 104,035 MW. Untuk *load shedding I* jumlah beban yang harus dilepas adalah 10% dari beban total yaitu 10,4 MW.



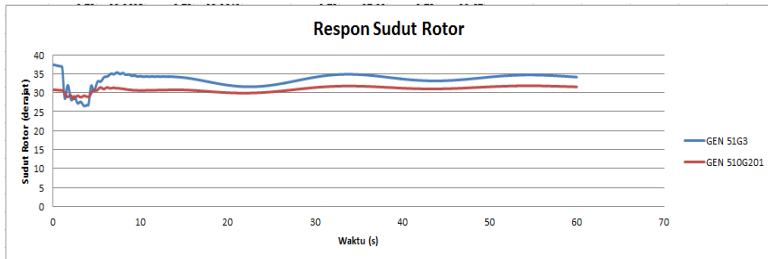
Gambar 4.52 Respon Frekuensi ketika generator 51G2 lepas dari sistem dan *load shedding I*

Hasil yang diperoleh setelah dilakukan *load shedding I*, respon frekuensi terendah menjadi 98,7%. Sehingga berdasarkan ANSI/IEEE C37.106-1987 frekuensi sistem sudah dalam kondisi aman untuk beroperasi.



Gambar 4.53 Respon Tegangan ketika generator 51G2 lepas dari sistem dan *load shedding I*

Respon tegangan terendah menjadi 97,2% dan *steady state* di 100,1%. dari data tersebut dapat dikatakan respon tegangan sistem masih sesuai standard dan masih bisa beroperasi dengan aman.

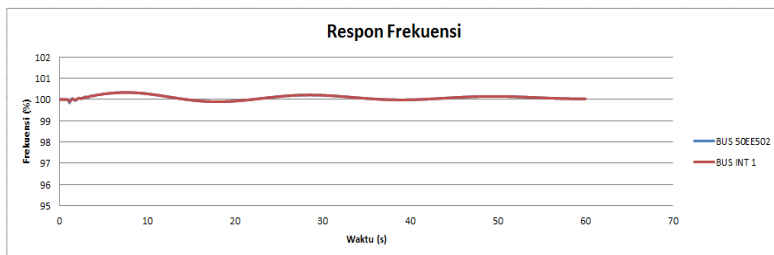


Gambar 4.54 Respon Sudut Rotor ketika generator 51G2 lepas dari sistem dan *load shedding I*

Respon sudut rotor paling rendah terjadi pada $27,1^\circ$ dan *steady state* di $34,8^\circ$. Pada kondisi ini, respon sudut rotor generator masih dianggap aman berdasarkan standar sudut rotor.

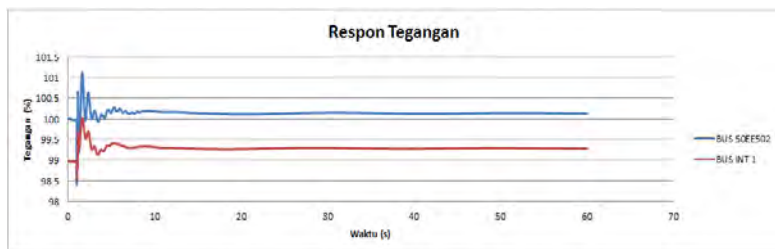
Berdasarkan respon frekuensi, tegangan, dan sudut rotor pada data di atas, dapat disimpulkan bahwa frekuensi kembali stabil dan berada pada kondisi yang aman dengan adanya pelepasan beban 1 langkah. Pelepasan beban tersebut juga berdampak pada kenaikan tegangan yang semakin baik dan aman berdasarkan standar tegangan yang telah dijelaskan sebelumnya. Kondisi sudut rotor yang mengalami osilasi juga masih berada pada kategori aman sehingga sistem dapat berjalan dengan baik ketika pelepasan beban pertama sebesar 10% atau sekitar 10,4 MW.

4.3.1.4.1.2 Generator 51G2 Trip + Load Shedding Status



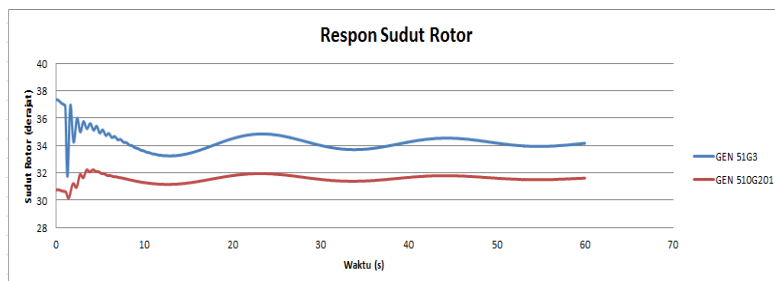
Gambar 4.55 Respon Frekuensi ketika generator 51G2 lepas dari sistem dan *load shedding status*

Hasil yang diperoleh setelah dilakukan *load shedding status*, respon frekuensi terendah menjadi 99,8% dan *steady state* di 100%. Berdasarkan ANSI/IEEE C37.106-1987 frekuensi sistem sudah dalam kondisi aman untuk beroperasi.



Gambar 4.56 Respon Tegangan ketika generator 51G2 lepas dari sistem dan *load shedding status*

Respon tegangan terendah menjadi 98,4% dan *steady state* di 100,1%. dari data tersebut dapat dikatakan respon tegangan sistem sudah sesuai standard dan masih bisa beroperasi dengan aman.



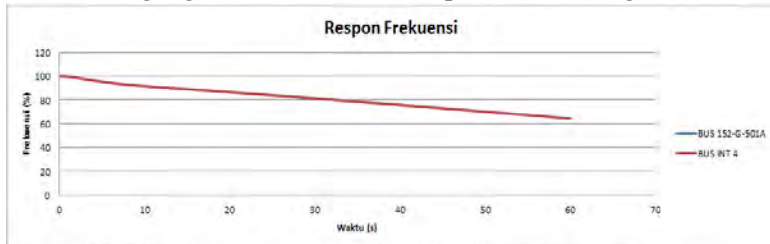
Gambar 4.57 Respon Sudut Rotor ketika generator 51G2 lepas dari sistem dan *load shedding status*

Respon sudut rotor paling tinggi terjadi pada 37,3° dan *steady state* di 34,1°. Pada kondisi ini, respon sudut rotor generator masih dianggap aman berdasarkan standar sudut rotor.

Berdasarkan respon frekuensi, tegangan, dan sudut rotor pada data di atas, dapat disimpulkan bahwa frekuensi kembali stabil dan berada pada kondisi yang aman dengan adanya pelepasan beban menggunakan status.

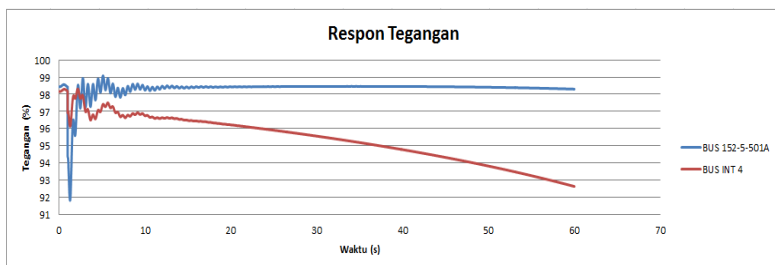
4.3.1.4.2 Generator 152G501B Trip

GEN 152G01B 15 MW lepas dari sistem pada $t = 1$ s, respon frekuensi, tegangan dan sudut rotor dapat dilihat sebagai berikut :



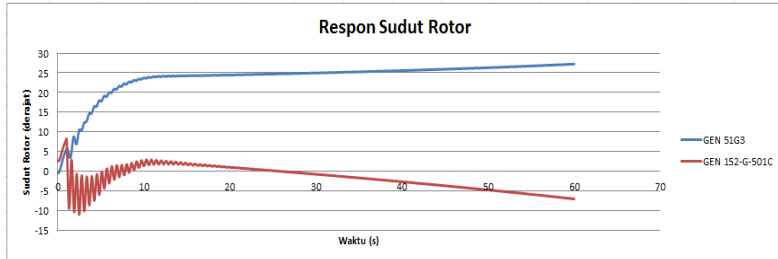
Gambar 4.58 Respon Frekuensi ketika generator 152G501B lepas dari sistem

Pada kasus GEN 15 MW lepas dari sistem pada $t = 1$ s, respon frekuensi bus terdekat dari generator yang lepas mengalami penurunan dengan nilai terendah sebesar 60% dan terus turun. Berdasarkan data tersebut, respon frekuensi tersebut belum memenuhi standart ANSI/IEEE C37.106-1987 yaitu frekuensi batas operasi minimal sebesar 99,84% (1 langkah) sehingga perlu dilakukan penanganan untuk memperbaiki respon frekuensi akibat gangguan tersebut.



Gambar 4.59 Respon Tegangan ketika generator 152G501B lepas dari sistem

Respon tegangan bus terdekat dari generator yang lepas mengalami penurunan dengan nilai terendah sesaat sebesar 96,2% dan terus turun. Pada kondisi ini berdasarkan standart tegangan PLN, dapat disimpulkan bahwa respon tegangan sistem belum berada pada kondisi aman untuk beroperasi. Sehingga perlu dilakukan penanganan untuk memperbaiki respon tegangan akibat gangguan tersebut.



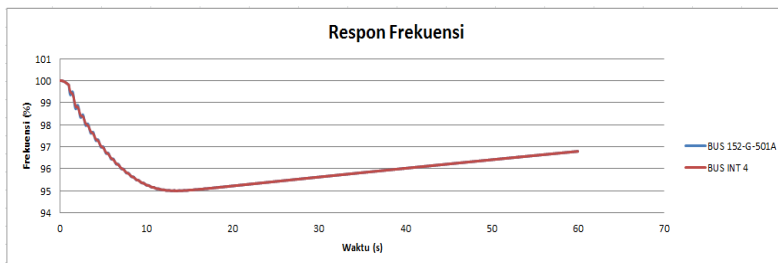
Gambar 4.60 Respon Sudut Rotor ketika generator 152G501B lepas dari sistem

Respon sudut rotor pada generator terdekat mengalami penurunan. Respon beresilasi di nilai terendah $-21,1^{\circ}$ dan terus mengalami penurunan. Pada kondisi ini, respon sudut rotor generator dianggap tidak aman berdasarkan standar sudut rotor.

Berdasarkan data dari respon frekuensi, tegangan, dan sudut rotor dapat disimpulkan bahwa respon frekuensi, tegangan dan sudut rotor berada pada kondisi yang tidak aman Sehingga perlu dilakukan pelepasan beban.

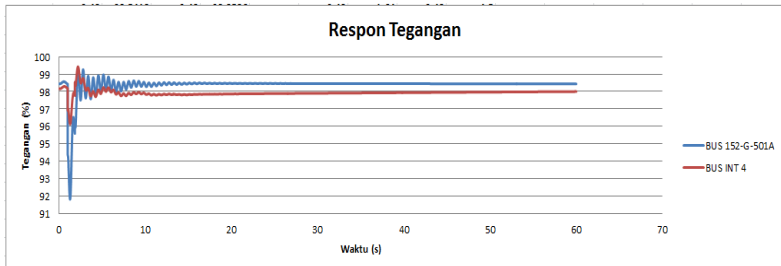
4.3.1.4.2.1 Generator 152G501B Trip + Load Shedding I

Pada 1,72 detik, frekuensi turun menjadi 98,83% sehingga Pelepasan beban atau *load shedding* dilakukan pada detik $1,72 + 0,12$ (waktu yang diperlukan sampai CB trip) = 1,84 detik. Total beban saat operasi ini adalah 104,035 MW. Untuk *load shedding I* jumlah beban yang harus dilepas adalah 10% dari beban total yaitu 10,4 MW.



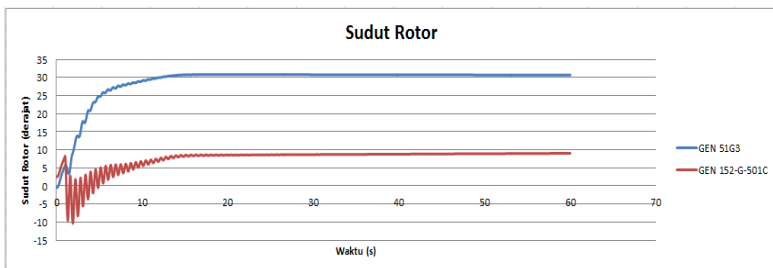
Gambar 4.61 Respon Frekuensi ketika generator 152G501B lepas dari sistem dan *load shedding I*

Hasil yang diperoleh setelah dilakukan *load shedding I*, respon frekuensi terendah menjadi 94,9%. respon frekuensi tersebut belum memenuhi standart ANSI/IEEE C37.106-1987 yaitu frekuensi batas operasi minimal sebesar 98,16% (2 langkah) sehingga perlu dilakukan penanganan untuk memperbaiki respon frekuensi akibat gangguan tersebut.



Gambar 4.62 Respon Tegangan ketika generator 152G501B lepas dari sistem dan *load shedding I*

respon tegangan terendah sesaat menjadi 91,8% dan *steady state* di 98,4%. dari data tersebut dapat dikatakan respon tegangan sistem sudah sesuai standard dan bisa beroperasi dengan aman.



Gambar 4.63 Respon Sudut Rotor ketika generator 152G501B lepas dari sistem dan *load shedding I*

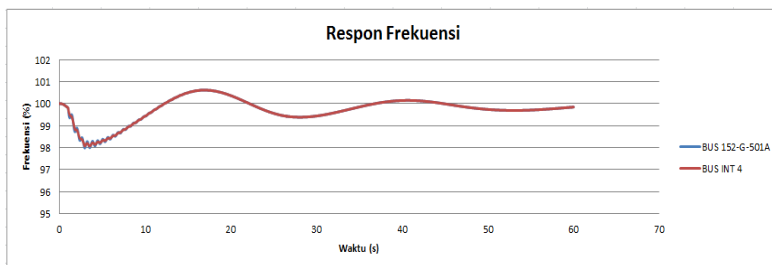
Respon sudut rotor paling rendah terjadi pada $-10,3^{\circ}$ dan *steady state* di $9,03^{\circ}$. Pada kondisi ini, respon sudut rotor generator masih dianggap aman berdasarkan standar sudut rotor.

Berdasarkan data dari respon frekuensi, tegangan, dan sudut rotor setelah dilakukan *load shedding I* dapat disimpulkan bahwa respon tegangan dan sudut rotor berada pada kondisi yang aman, namun untuk

respon frekuensi masih berada belum aman untuk beroperasi. Sehingga perlu dilakukan pelepasan beban kedua.

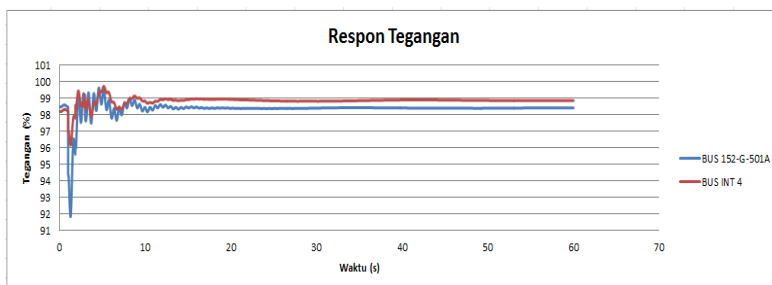
4.3.1.4.2.2 Generator 152G501B Trip + Load Shedding II

Pada 2,82 detik, frekuensi turun menjadi 98,15% sehingga Pelepasan beban atau *load shedding* dilakukan pada detik $2,82 + 0,12$ (waktu yang diperlukan sampai CB trip) = 2,94 detik. Total beban saat operasi ini adalah 104,035 MW. Untuk *load shedding II* jumlah beban yang harus dilepas adalah 15% dari beban total yaitu 15,6 MW.



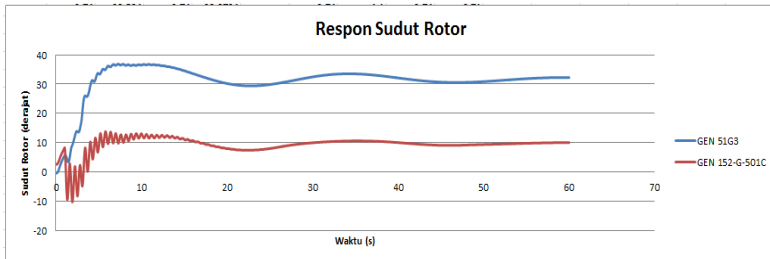
Gambar 4.64 Respon Frekuensi ketika generator 152G501B lepas dari sistem dan *load shedding II*

Hasil yang diperoleh setelah dilakukan *load shedding II*, respon frekuensi terendah menjadi 97,9%. Sehingga berdasarkan ANSI/IEEE C37.106-1987 frekuensi sistem sudah dalam kondisi aman untuk beroperasi.



Gambar 4.65 Respon Tegangan ketika generator 152G501B lepas dari sistem dan *load shedding II*

Respon tegangan terendah sesaat menjadi 91,8% dan *steady state* di 98,3%. dari data tersebut dapat dikatakan respon tegangan sistem masih sesuai standard dan masih bisa beroperasi dengan aman.

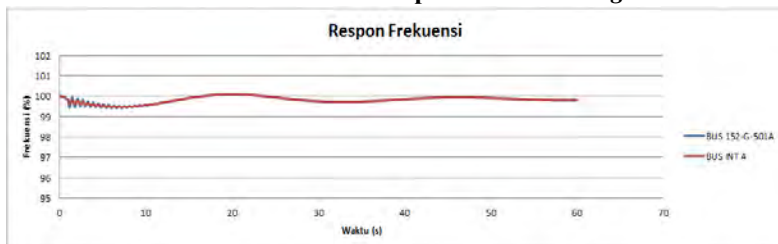


Gambar 4.66 Respon Sudut Rotor ketika generator 152G501B lepas dari sistem dan *load shedding II*

Respon sudut rotor paling rendah terjadi pada $-10,3^\circ$ dan *steady state* di $9,99^\circ$. Pada kondisi ini, respon sudut rotor generator masih dianggap aman berdasarkan standar sudut rotor.

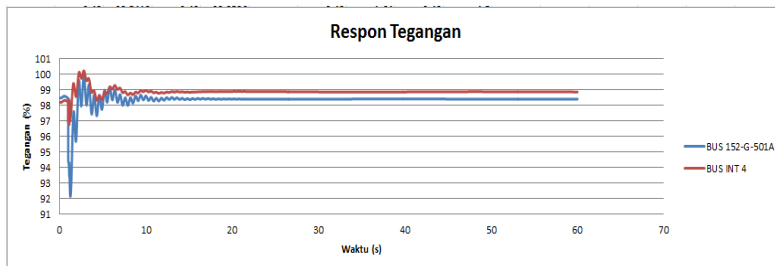
Berdasarkan respon frekuensi, tegangan, dan sudut rotor pada data di atas, dapat disimpulkan bahwa frekuensi kembali stabil dan berada pada kondisi yang aman dengan adanya pelepasan beban 2 langkah. Pelepasan beban tersebut juga berdampak pada kenaikan tegangan yang semakin baik dan aman berdasarkan standar tegangan yang telah dijelaskan sebelumnya. Kondisi sudut rotor yang mengalami osilasi juga masih berada pada kategori aman sehingga sistem dapat berjalan dengan baik ketika pelepasan beban pertama sebesar 10% dan kedua sebesar 15 % atau sekitar 26 MW.

4.3.1.4.2.3 Generator 152G501B Trip + *Load Shedding Status*



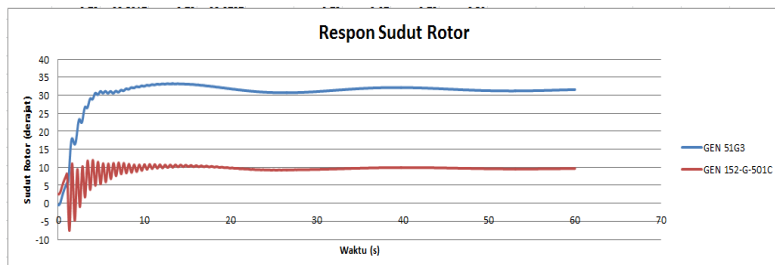
Gambar 4.67 Respon Frekuensi ketika generator 152G501B lepas dari sistem dan *load shedding status*

Hasil yang diperoleh setelah dilakukan *load shedding status*, respon frekuensi terendah menjadi 99,4% dan *steady state* di 99,7%. Berdasarkan ANSI/IEEE C37.106-1987 frekuensi sistem sudah dalam kondisi aman untuk beroperasi.



Gambar 4.68 Respon Tegangan ketika generator 152G501B lepas dari sistem dan *load shedding status*

Respon tegangan terendah sesaat menjadi 92,1% dan *steady state* di 98,3%. dari data tersebut dapat dikatakan respon tegangan sistem sudah sesuai standard dan masih bisa beroperasi dengan aman.



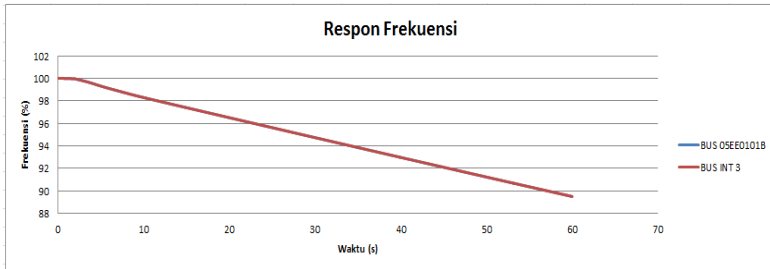
Gambar 4.69 Respon Sudut Rotor ketika generator 152G501B lepas dari sistem dan *load shedding status*

Respon sudut rotor paling tinggi terjadi pada 33,2° dan *steady state* di 31,5°. Pada kondisi ini, respon sudut rotor generator masih dianggap aman berdasarkan standar sudut rotor.

Berdasarkan respon frekuensi, tegangan, dan sudut rotor pada data di atas, dapat disimpulkan bahwa frekuensi kembali stabil dan berada pada kondisi yang aman dengan adanya pelepasan beban menggunakan status.

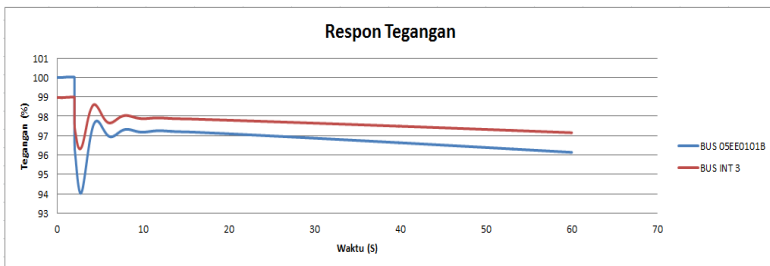
4.3.1.4.3 Generator 051G102 Trip

GEN 051G102 20 MW lepas dari sistem pada $t = 1$ s, respon frekuensi, tegangan dan sudut rotor dapat dilihat sebagai berikut :



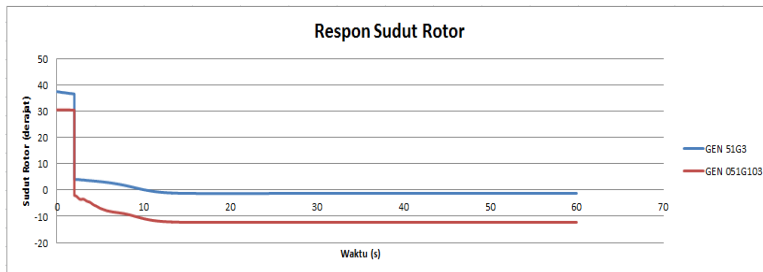
Gambar 4.70 Respon Frekuensi ketika generator 051G102 lepas dari sistem

Pada kasus GEN 20 MW lepas dari sistem pada $t = 1$ s, respon frekuensi bus terdekat dari generator yang lepas mengalami penurunan dengan nilai terendah sebesar 89% dan terus menurun. Berdasarkan data tersebut, respon frekuensi tersebut belum memenuhi standart ANSI/IEEE C37.106-1987 yaitu frekuensi batas operasi minimal sebesar 99,84% (1 langkah) sehingga perlu dilakukan penanganan untuk memperbaiki respon frekuensi akibat gangguan tersebut.



Gambar 4.71 Respon Tegangan ketika generator 051G102 lepas dari sistem

Respon tegangan bus terdekat dari generator yang lepas mengalami penurunan dengan nilai terendah sesaat sebesar 94% dan terus menurun. Pada kondisi ini berdasarkan standart tegangan PLN, dapat disimpulkan bahwa respon tegangan sistem belum berada pada kondisi aman untuk beroperasi.



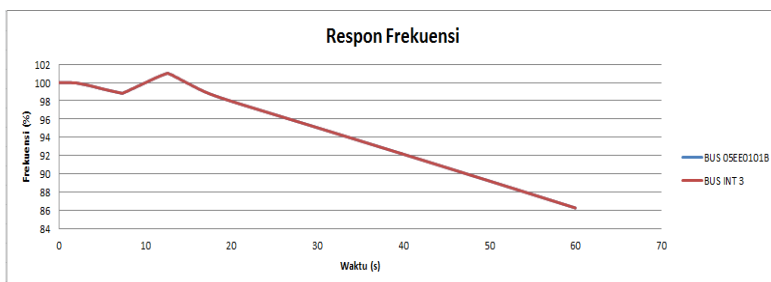
Gambar 4.72 Respon Sudut Rotor ketika generator 051G102 lepas dari sistem

Respon sudut rotor pada generator terdekat mengalami penurunan. Respon sudut rotor turun dan *steady state* di $-12,9^\circ$. Pada kondisi ini, respon sudut rotor generator masih dianggap aman berdasarkan standar sudut rotor.

Berdasarkan data dari respon frekuensi, tegangan, dan sudut rotor dapat disimpulkan bahwa respon sudut rotor berada pada kondisi yang aman. Namun respon frekuensi dan tegangan masih dibawah standar yang diperbolehkan sehingga perlu dilakukan pelepasan beban.

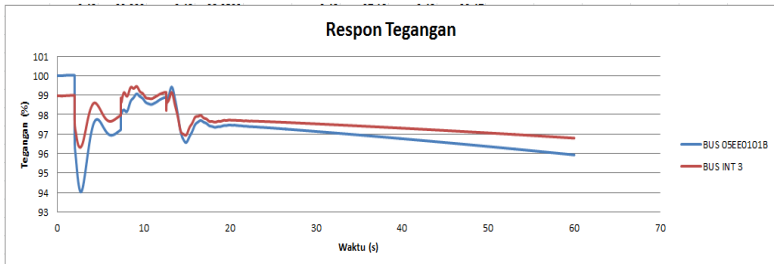
4.3.1.4.3.1 Generator 051G102 Trip + Load Shedding I

Pada 7,24 detik, frekuensi turun menjadi 98,83% sehingga Pelepasan beban atau *load shedding* dilakukan pada detik $7,24 + 0,12$ (waktu yang diperlukan sampai CB trip) = 7,36 detik. Total beban saat operasi ini adalah 104,035 MW. Untuk *load shedding I* jumlah beban yang harus dilepas adalah 10% dari beban total yaitu 10,4 MW.



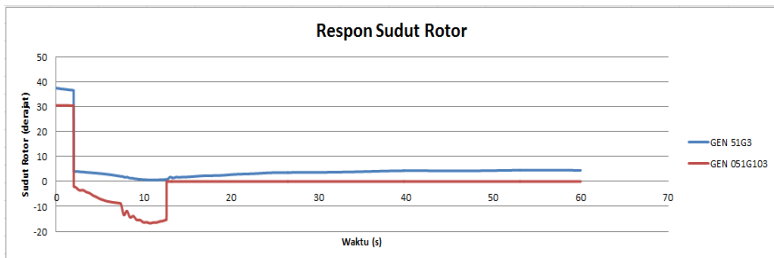
Gambar 4.73 Respon Frekuensi ketika generator 051G102 lepas dari sistem dan *load shedding I*

Hasil yang diperoleh setelah dilakukan *load shedding 1*, respon frekuensi terendah masih di 86% dan terus menurun. Respon frekuensi tersebut belum memenuhi standart ANSI/IEEE C37.106-1987 yaitu frekuensi batas operasi minimal sebesar 98,16% (2 langkah) sehingga perlu dilakukan penanganan untuk memperbaiki respon frekuensi akibat gangguan tersebut.



Gambar 4.74 Respon Tegangan ketika generator 051G102 lepas dari sistem dan *load shedding 1*

Respon tegangan bus terdekat dari generator yang lepas mengalami penurunan dengan nilai terendah sesaat sebesar 94% dan terus menurun. Pada kondisi ini berdasarkan standart tegangan PLN, dapat disimpulkan bahwa respon tegangan sistem belum berada pada kondisi aman untuk beroperasi.



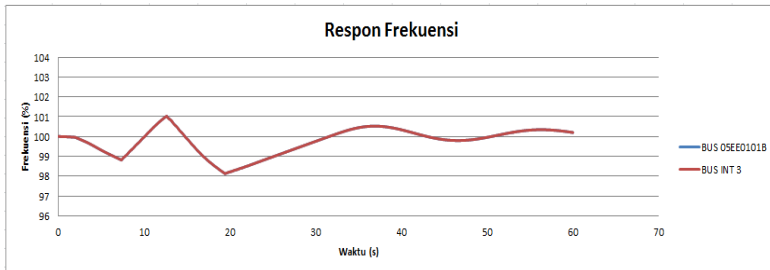
Gambar 4.75 Respon Sudut Rotor ketika generator 051G102 lepas dari sistem dan *load shedding 1*

Respon sudut rotor sudah *steady state* di 4,44°. Pada kondisi ini, respon sudut rotor generator masih dianggap aman berdasarkan standar sudut rotor.

Berdasarkan data dari respon frekuensi, tegangan, dan sudut rotor setelah dilakukan *load shedding I* dapat disimpulkan bahwa sudut rotor berada pada kondisi yang aman, namun untuk respon frekuensi dan tegangan masih berada belum aman untuk beroperasi. Sehingga perlu dilakukan pelepasan beban kedua.

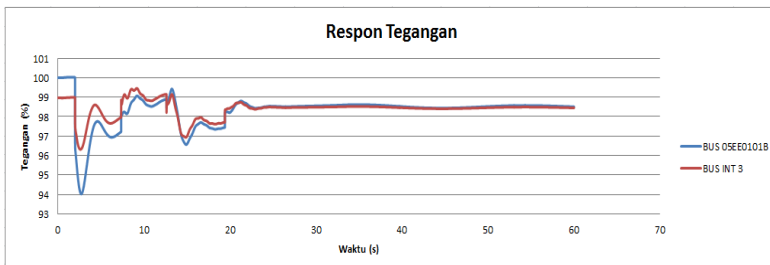
4.3.1.4.3.2 Generator 051G102 Trip + Load Shedding II

Pada 19,3 detik, frekuensi turun menjadi 98,15% sehingga Pelepasan beban atau *load shedding* dilakukan pada detik 19,3 + 0,12 (waktu yang diperlukan sampai CB trip) = 19,42 detik. Total beban saat operasi ini adalah 104,035 MW. Untuk *load shedding II* jumlah beban yang harus dilepas adalah 15% dari beban total yaitu 15,6 MW.



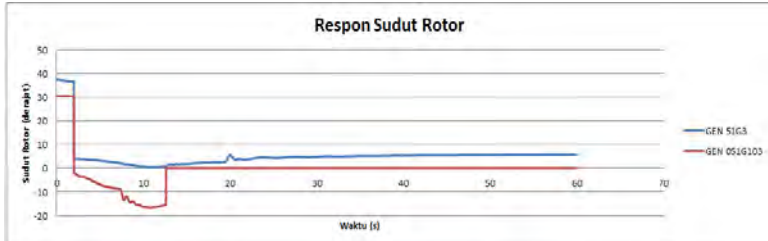
Gambar 4.76 Respon Frekuensi ketika generator 051G102 lepas dari sistem dan *load shedding II*

Hasil yang diperoleh setelah dilakukan *load shedding II*, respon frekuensi terendah menjadi 98,12%. Sehingga berdasarkan ANSI/IEEE C37.106-1987 frekuensi sistem sudah dalam kondisi aman untuk beroperasi.



Gambar 4.77 Respon Tegangan ketika generator 051G102 lepas dari sistem dan *load shedding II*

Respon tegangan terendah sesaat menjadi 94% dan *steady state* di 98,5%. dari data tersebut dapat dikatakan respon tegangan sistem masih sesuai standard dan masih bisa beroperasi dengan aman.

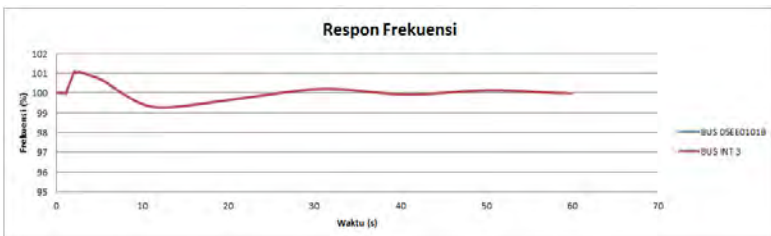


Gambar 4.78 Respon Sudut Rotor ketika generator 051G102 lepas dari sistem dan *load shedding II*

Respon sudut rotor *steady state* di $5,63^\circ$. Pada kondisi ini, respon sudut rotor generator masih dianggap aman berdasarkan standar sudut rotor.

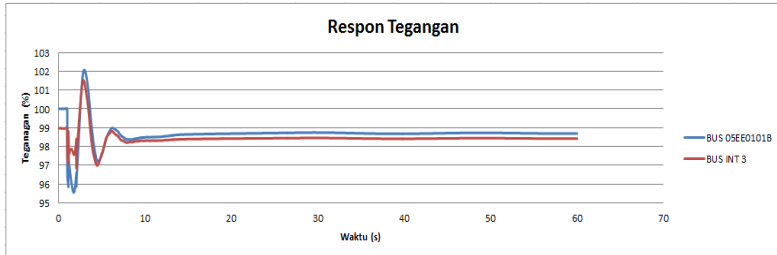
Berdasarkan respon frekuensi, tegangan, dan sudut rotor pada data di atas, dapat disimpulkan bahwa frekuensi kembali stabil dan berada pada kondisi yang aman dengan adanya pelepasan beban 2 langkah. Pelepasan beban tersebut juga berdampak pada kenaikan tegangan yang semakin baik dan aman berdasarkan standar tegangan yang telah dijelaskan sebelumnya. Kondisi sudut rotor yang mengalami osilasi juga masih berada pada kategori aman sehingga sistem dapat berjalan dengan baik ketika pelepasan beban pertama sebesar 10% dan kedua sebesar 15 % atau sekitar 26 MW.

4.3.1.4.3.3 Generator 051G102 Trip + Load Shedding Status



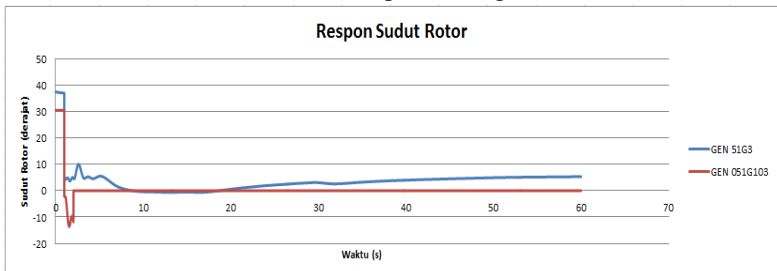
Gambar 4.79 Respon Frekuensi ketika generator 051G102 lepas dari sistem dan *load shedding status*

Hasil yang diperoleh setelah dilakukan *load shedding status*, respon frekuensi terendah menjadi 99,2% dan *steady state* di 99,9%. Berdasarkan ANSI/IEEE C37.106-1987 frekuensi sistem sudah dalam kondisi aman untuk beroperasi.



Gambar 4.80 Respon Tegangan ketika generator 051G102 lepas dari sistem dan *load shedding status*

Respon tegangan terendah menjadi 95,5% dan *steady state* di 98,6%. dari data tersebut dapat dikatakan respon tegangan sistem sudah sesuai standard dan masih bisa beroperasi dengan aman.



Gambar 4.81 Respon Sudut Rotor ketika generator 051G102 lepas dari sistem dan *load shedding status*

Respon sudut rotor paling tinggi terjadi pada 10,1° dan *steady state* di 5,3°. Pada kondisi ini, respon sudut rotor generator masih dianggap aman berdasarkan standar sudut rotor.

Berdasarkan respon frekuensi, tegangan, dan sudut rotor pada data di atas, dapat disimpulkan bahwa frekuensi kembali stabil dan berada pada kondisi yang aman dengan adanya pelepasan beban menggunakan status.

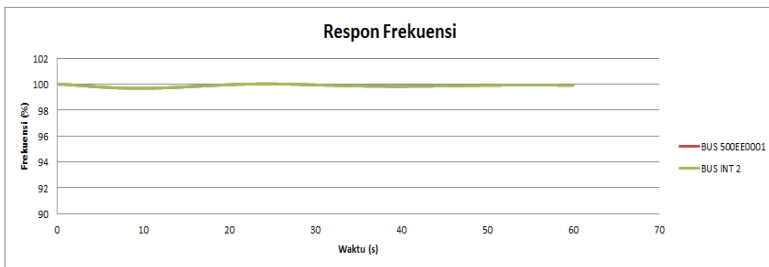
4.3.2 Simulasi Kestabilan Transien *Motor Starting*

Pada simulasi kestabilan transien *starting motor*, diasumsikan bahwa sebuah motor induksi tiga fasa akan dioperasikan atau dihubungkan ke sistem sesaat setelah sistem beroperasi. Motor yang dioperasikan memiliki daya yang cukup besar sehingga memiliki pengaruh terhadap kestabilan sistem yang akan dianalisis. Respon kestabilan akan diperhatikan melalui respon frekuensi, tegangan, dan sudut rotor sistem kelistrikan dengan membandingkan nilai respon terhadap standar yang telah digunakan sebelumnya.

4.3.2.1 TS MS1

Pola operasi yang digunakan adalah sama dengan pola operasi saat studi kasus TS-11 yaitu Normal Operasi Kondisi Interkoneksi, Beban PLBC dan IPAL ON, 051G103, 51G201, 152-G-501B OFF, serta Generator FIT.

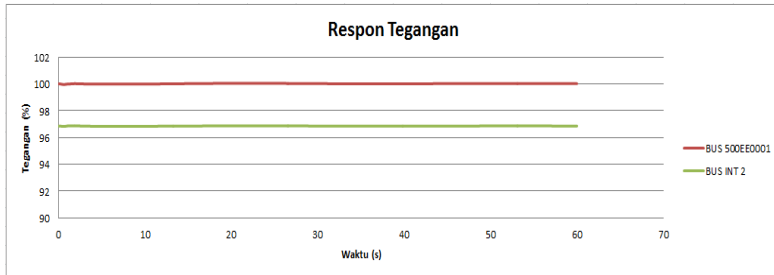
Pada kasus MS1 yaitu motor akan beroperasi ketika sistem baru beroperasi selama 1 detik. Respon frekuensi, tegangan, dan sudut rotor akan diamati dengan mempertimbangkan referensi standar tegangan yang berdasar pada IEEE Std C37.106-2003. Motor yang akan beroperasi merupakan motor induksi tiga fasa dengan ID motor yaitu 260K101/102AM yang memiliki kapasitas daya 2700 HP. Berikut dapat dilihat respon frekuensi, tegangan dan sudut rotor ketika motor di-*start*.



Gambar 4.82 Respon Frekuensi ketika motor 260K101/102AM terhubung ke sistem

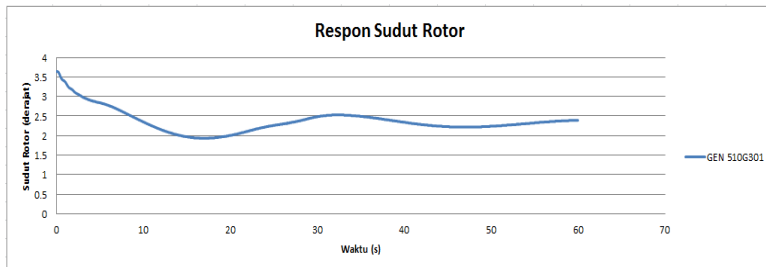
Saat motor 260K101/102AM (2700 HP) start dan terhubung ke sistem pada $t = 1s$, respon frekuensi bus terdekat dari generator yang lepas mengalami penurunan hingga 99,6% dan *steady state* di 99,9%. Berdasarkan data tersebut, respon frekuensi tersebut masih memenuhi

standart ANSI/IEEE C37.106-1987 Sehingga frekuensi dikatakan beroperasi di kondisi aman.



Gambar 4.83 Respon Tegangan ketika motor 260K101/102AM terhubung ke sistem

Respon tegangan bus terdekat dari generator yang lepas mengalami penurunan dengan nilai terendah sesaat sebesar 96,8%. Pada kondisi ini berdasarkan standart tegangan PLN, dapat disimpulkan bahwa respon tegangan sistem masih berada pada kondisi aman untuk beroperasi.



Gambar 4.84 Respon Sudut Rotor ketika motor 260K101/102AM terhubung ke sistem

Respon sudut rotor pada generator terdekat mengalami penurunan. Respon sudut rotor *steady state* di 2,3°. Pada kondisi ini, respon sudut rotor generator masih dianggap aman berdasarkan standar sudut rotor.

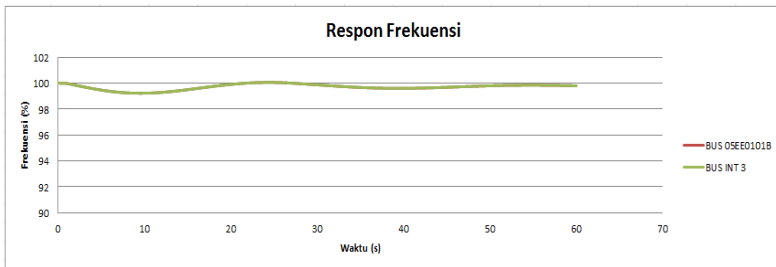
Berdasarkan data dari respon frekuensi, tegangan, dan sudut rotor saat kondisi motor 260K101/102AM *start* dapat disimpulkan bahwa respon frekuensi, tegangan dan sudut rotor berada pada kondisi yang

aman. Sehingga sistem masih dapat beroperasi dengan respon tersebut tanpa perlu dilakukan pelepasan beban.

4.3.2.2 TS MS2

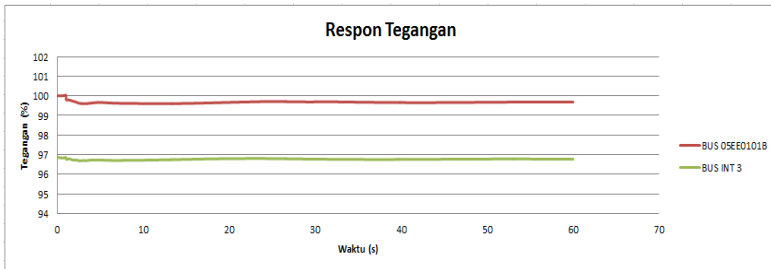
Pola operasi yang digunakan adalah sama dengan pola operasi saat studi kasus TS-11 yaitu Normal Operasi Kondisi Interkoneksi, Beban PLBC dan IPAL ON, 051G103, 51G201, 152-G-501B OFF, serta Generator FIT.

Pada kasus MS2 yaitu motor akan beroperasi ketika sistem baru beroperasi selama 1 detik. Respon frekuensi, tegangan, dan sudut rotor akan diamati dengan mempertimbangkan referensi standar tegangan yang berdasar pada IEEE Std C37.106-2003. Motor yang akan beroperasi merupakan motor induksi tiga fasa dengan ID motor yaitu 014K102ABCM yang memiliki kapasitas daya 2500 HP. Berikut pada kan dilihat respon frekuensi, tegangan dan sudut rotor ketika motor di-start.



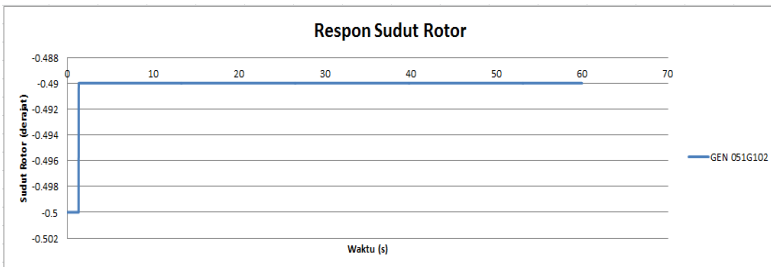
Gambar 4.85 Respon Frekuensi ketika motor 014K102ABCM terhubung ke sistem

Saat motor 014K102ABCM (2500 HP) start dan terhubung ke sistem pada $t = 1s$, respon frekuensi bus terdekat dari generator yang lepas mengalami penurunan hingga 99,2% dan *steady state* di 99,8% Berdasarkan data tersebut, respon frekuensi tersebut masih memenuhi standart ANSI/IEEE C37.106-1987 Sehingga frekuensi dikatakan beroperasi di kondisi aman.



Gambar 4.86 Respon Tegangan ketika motor 014K102ABCM terhubung ke sistem

Respon tegangan bus terdekat dari generator yang lepas mengalami penurunan dengan nilai terendah sebesar 96,6%. Pada kondisi ini berdasarkan standart tegangan PLN, dapat disimpulkan bahwa respon tegangan sistem masih berada pada kondisi aman untuk beroperasi.



Gambar 4.87 Respon Sudut Rotor ketika motor 014K102ABCM terhubung ke sistem

Respon sudut rotor pada generator terdekat mengalami penurunan. Respon sudut rotor *steady state* di $-0,49^\circ$. Pada kondisi ini, respon sudut rotor generator masih dianggap aman berdasarkan standar sudut rotor.

Berdasarkan data dari respon frekuensi, tegangan, dan sudut rotor saat kondisi motor 014K102ABCM *start* dapat disimpulkan bahwa respon frekuensi, tegangan dan sudut rotor berada pada kondisi yang aman. Sehingga sistem masih dapat beroperasi dengan respon tersebut tanpa perlu dilakukan pelepasan beban.

4.4 Rekapitulasi Data Kestabilan di PT. Pertamina RU IV Cilacap

Dari simulasi yang telah dilakukan, data hasil seluruh respon terutama nilai minimum dari frekuensi dan tegangan serta *load shedding* yang telah dilakukan terangkum dalam Tabel 4.1 dan Tabel 4.2

Tabel 4.1 merupakan rekapitulasi data hasil studi kasus berupa gangguan generator lepas. Dengan keterangan sebagai berikut :

- A = GEN 51G2 (8 MW) TRIP
- B = GEN 152G501A (15 MW) TRIP
- C = GEN 051G102 (20 MW) TRIP

Tabel 4.1 Rekapitulasi Data Studi Kasus Generator Lepas

Studi kasus		Frekuensi min (%)		Tegangan min (%)		kondisi		Load shedding
		33 kv	13,8 kv	33 kv	13,8 kv	f	v	
TS1	A	-	99,9	96,7	96,4	√	√	No Load Shedding
	C	98,7	98,7	95,9	97,6	√	√	Load Shedding I
TS2	A	99,7	99,7	96,3	99,7	√	√	No Load Shedding
	B	98,7	98,7	95,7	91,9	√	√	Load Shedding I
	C	98,8	98,8	97,7	96,6	√	√	Load Shedding I
TS3	A	99,8	99,8	97,1	94,6	√	√	No Load Shedding
	B	99,1	99	95,5	91,8	√	√	No Load Shedding
	C	98,7	98,8	97,9	97,5	√	√	Load Shedding I
TS4	A	98,7	98,7	98,3	97,2	√	√	Load Shedding II
	B	98	97,9	96,1	91,8	√	√	Load Shedding II
	C	98,1	98,1	96,3	94	√	√	Load Shedding II

Sedangkan Tabel 4.2 merupakan rekapitulasi data hasil studi kasus berupa gangguan *Motor Starting*. Dengan keterangan sebagai berikut :

A = MOT 260K101AM (2700 HP) START

B = MOT 014K102ABCM (2500 HP) START

Tabel 4.2 Rekapitulasi Data Studi Kasus *Motor Starting*

Studi kasus		Frekuensi min (%)		Tegangan min (%)		kondisi		Load shedding
		33 kv	13,8 kv	33 kv	13,8 kv	f	v	
TS11	A	99,6	99,6	96,8	99,9	√	√	No Load Shedding
	B	99,2	99,2	96,6	99,5	√	√	No Load Shedding

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil yang diperoleh dari simulasi dan analisis pada Tugas Akhir ini, dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Gangguan lepasnya generator pada sistem di beberapa bentuk operasi menyebabkan penurunan frekuensi pada bus 13,8 kv maupun bus 33 kv. Sehingga perlu dilakukan penanganan untuk mengembalikan kestabilan sistem dengan melakukan pelepasan beban (*load shedding*)
2. Gangguan *starting motor* dilakukan pada pola operasi kemungkinan terburuk, sistem masih mampu mempertahankan kestabilannya saat motor starting 2700 HP yang menggambarkan motor terbesar di plan Pertamina RU IV Cilacap terhubung ke sistem. Hal ini juga memberikan jaminan bahwa motor starting akan berhasil pada pola operasi yang lain.
3. Pelepasan beban (*load shedding*) yang dilakukan telah berhasil mengembalikan kestabilan sistem. Pelepasan beban yang digunakan mengacu pada standart ANSI/IEEE 3 langkah dengan pelepasan beban sebesar 10% untuk langkah 1 dan 15% untuk langkah 2.
4. Di beberapa operasi, Penggunaan frekuensi standart ANSI/IEEE dalam pelepasan beban (*load shedding*) mampu memperbaiki respon frekuensi lebih baik daripada standart frekuensi yang selama ini digunakan di PT. Pertamina RU IV Cilacap

5.2 Saran

1. Apabila pada sistem kelistrikan PT Pertamina RU IV Cilacap terdapat prioritas beban yang tidak boleh dilepas, maka pelepasan beban dilakukan pada beban beban yang tidak terlalu berpengaruh pada sistem produksi .
2. Dalam perancangan pelepasan beban (*load shedding*), beban beban yang dilepas sebaiknya berada di dekat generator atau bus yang mengalami gangguan.
3. Penggunaan *load shedding status* direkomendasikan sebagai langkah pertama dalam mengembalikan kestabilan sistem di PT Pertamina RU IV Cilacap dengan *load shedding* frekuensi ANSI/IEEE sebagai *backup*.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

Tabel Prioritas Beban untuk Load Shedding

LOAD ID	CIRCUIT BREAKER	KW
Lump 79	52 – A10	1,4
Lump 12	52 – 14	0,4
Lump 34	52 – 33	0,08
Lump 25	52 – 24	0,8
Lump 35	52 – 34	0,2
Lump 37	52 – 35	0,8
Lump 19	52 – 17	1,2
Lump 27	52 – 26	1,4
Lump 73	52 – A4	0,7
Lump 94	52 – B6	0,7
Lump 75	52 – A6	0,5
Lump 95	52 – B7	0,4
Lump 99	52 – B11	1,1
Lump 65	52 – E4	2,7
Lump 67	52 – E5	3,4
Lump 66	52 – E6	0,1
Lump 69	52 – E7	0,5
Lump 46	52 – F3	0,4
Lump 16	52 – 16	2,8
Lump 29	52 – 25	3,1
Lump 33	52 – 27	1
Lump 36	52 – 36	0,9
Lump 21	52 – 19	1,1
Lump 38	52 – 38	0,5

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

Data Studi Kasus Generator Lepas di PT Pertamina RU IV Cilacap

Menggunakan standart *Load Shedding* Pertamina

Studi kasus		Frekuensi min (%)		Tegangan min (%)		kondisi		Load shedding
		33 kv	13,8 kv	33 kv	13,8 kv	f	v	
TS1	A	-	100,1	-	99,6	√	√	No Load Shedding
	C	-	98,4	-	99,4	√	√	No Load Shedding
TS2	A	99,7	99,7	97,5	98,9	√	√	No Load Shedding
	B	97,4	97,4	96,4	97,0	√	√	No Load Shedding
	C	98,6	98,6	97,6	96,6	√	√	No Load Shedding
TS3	A	95,7	95,7	99,6	97,8	√	√	No Load Shedding
	B	97,9	97,9	95,3	92,3	√	√	No Load Shedding
	C	97,3	97,3	97,5	98,3	√	√	No Load Shedding
TS4	A	96,9	96,9	98,0	99,2	√	√	Load Shedding II
	B	96,1	96,1	96,1	99,0	√	√	Load Shedding II
	C	96,9	96,9	98,9	91,5	√	√	Load Shedding II

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

**Data Kestabilan Sistem berdasarkan *Demand Factor*
(keseimbangan daya)**

Tanpa mempertimbangkan standart frekuensi, tegangan dan sudut rotor

Studi kasus		Total Pembangkitan (MW)	Total Pembebanan (MW)	<i>Demand Factor (%)</i>
TS 1	A	67,32	67,32	90
	C	67,32	67,32	80
TS 2	A	104	104,2	94
	B	104	104,2	89,2
	C	104	104,2	84,4
TS 3	A	104	103,8	93
	B	104	103,8	89,5
	C	104	103,8	83,8
TS 4	A	104	104	93
	B	104	104	85,5
	C	104	104	81,7

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Marsudi, Djiteng, “**Operasi Sistem Tenaga Listrik**”, Yogyakarta : Graha Ilmu, 2006.
- [2] Saadat, Hadi, “**Power System Analysis**”, McGraw-Hill Inc., 1999.
- [3] IEEE/CIGRE Joint Task Force on Stability Terms and Definitions, “**Definition and Classification of Power System Stability**”, IEEE Transactions on Power System , Vol. 19, No. 2, May 2004
- [4] Soeprijanto, Adi. “**Desain Kontroler untuk Kestabilan Dinamik Sistem tenaga Listrik**”. ITS Press, Surabaya, 2012.
- [5] Sulasno, “**Analisa Sistem Tenaga Listrik**”, Satya Wacana, Semarang, 1993.
- [6] ANSI/IEEE C37.106-1987, “**IEEE Guide for Abnormal Frequency Protection for Power Generating Plants**”.



(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BIOGRAFI PENULIS



Firdaus Ariansyah merupakan anak terakhir dari empat bersaudara. Lahir di Sidoarjo pada tanggal 11 April 1992, dan menyelesaikan pendidikan D3 di Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya jurusan Teknik Elektro bidang studi Computer Control pada tahun 2013 dengan Tugas Akhir mengenai sistem autopilot pada robot. Sekarang penulis melanjutkan pendidikan di S1 Teknik Elektro Institut Teknologi Sepuluh Nopember program studi Teknik Sistem Tenaga dan mengambil Tugas Akhir yang berfokus pada analisis kestabilan transien. Penulis juga berencana mengambil gelar master di bidang yang sama dengan meneruskan pendidikan S2 di Ecole Polytechnique Paris, Perancis. Penulis bisa dihubungi melalui 085732031560 atau melalui email vyrdauz@gmail.com